

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRUNO LEANDRO NENEVÊ

PROPOSTA DE ENSAIO PARA VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO VERTICAL EXTERNO EXPOSTAS À AÇÃO
DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO

CURITIBA

2020

BRUNO LEANDRO NENEVÊ

PROPOSTA DE ENSAIO PARA VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO VERTICAL EXTERNO EXPOSTAS À AÇÃO
DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO

Dissertação de mestrado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa

Coorientador: Prof. Dr. Ronaldo Alves de Medeiros Junior

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

N437p

Nenevê, Bruno Leandro

Proposta de ensaio para verificação do comportamento de argamassas de revestimento vertical externo expostas à ação de calor e choque térmico [recurso eletrônico] / Bruno Leandro Nenevê. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2020.

Orientadora: Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa.
Coorientador: Ronaldo Alves de Medeiros Junior.

1. Argamassa. 2. Revestimentos. 3. Materiais de construção - Vida útil. I. Universidade Federal do Paraná. II. Costa, Marianne do Rocio de Mello Maron da. III. Medeiros Junior, Ronaldo Alves de Medeiros. IV. Título.

CDD: 620.135

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **BRUNO LEANDRO NENEVÊ** intitulada: ***Proposta de ensaio para verificação do comportamento de argamassas de revestimento vertical externo expostas à ação de calor e choque térmico***, sob orientação da Profa. Dra. MARIENNE DO ROCIO DE MELLO MARON DA COSTA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 25 de Setembro de 2020.

Assinatura Eletrônica

25/09/2020 16:14:46.0

MARIENNE DO ROCIO DE MELLO MARON DA COSTA

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

29/09/2020 20:29:09.0

ANGELA BORGES MASUERO

Avaliador Externo (UNIVER. FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL)

Assinatura Eletrônica

25/09/2020 17:43:04.0

ELIANE BETÂNIA CARVALHO COSTA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar o dom da vida e proporcionar que este momento fosse possível através de suas bênçãos.

Aos meus pais, Marcelo e Luciane, que sempre me apoiaram e não mediram esforços para garantir minha educação e, também, por todos os ensinamentos e amor transmitidos.

Aos meus irmãos, Gabriel e Isadora, pelo companheirismo, amor fraterno, amizade e por todos os momentos de alegria e aprendizado compartilhados.

À minha Ana Carolina, por todo apoio, carinho, paciência e amor incondicional e, também, por todo incentivo recebido ao longo desse percurso nos momentos de dificuldade.

Aos meus avós, tios, primos e toda a minha família, por acreditarem em mim, por me apoiarem e por estarem sempre presentes.

À minha orientadora, Professora Dr^a Marienne do Rocio de Mello Maron da Costa, e ao meu coorientador, Professor Dr. Ronaldo Alves de Medeiros Junior, por todo auxílio prestado e conhecimentos transmitidos ao longo dessa jornada, possibilitando-me chegar até aqui.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil e companheiros de trabalho do Departamento de Engenharia do Tribunal de Justiça do Estado do Paraná, por todos os conhecimentos que me proporcionaram ao longo desses anos de graduação, mestrado e trabalho.

Aos técnicos laboratoristas, por toda ajuda e companheirismo nas atividades desenvolvidas nas dependências do LATECA.

Aos meus amigos e colegas de turma – em especial a Mateus Edilson Gomes Dobrovolski, Roberto Luiz Dias, Rafael Luiz Neves de Oliveira, Guilherme da Silva Munhoz, Maria Clara Pinto e Juan Pedro Luvizotti Orellana –, pelos momentos vividos, desafios vencidos, conhecimentos adquiridos e suporte para chegar até aqui.

A todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente à realização desse trabalho.

“Tudo posso Naquele que me fortalece”

(Filipenses 4:13)

RESUMO

Em virtude do recorrente aparecimento de manifestações patológicas em obras de construção civil, o tema durabilidade adquire ênfase. Tal fato é corroborado pelo advento da NBR 15575 (ABNT, 2013). Os sistemas de vedações verticais externas (SVVE) das edificações, tal como fachadas executadas em revestimento de argamassa, estão sujeitos a solicitações de origem térmica que podem comprometer seu desempenho. Desse modo, a supracitada norma de desempenho prescreve, para fins de avaliação da durabilidade desses sistemas, um procedimento de ensaio denominado “Verificação do comportamento de SVVE exposto à ação de calor e choque térmico”. Todavia, a execução deste ensaio pode ser complexa e limitada, em virtude dos elevados custos e resíduos associados, decorrentes do volume das amostras, equipamentos envolvidos e ausência de parâmetros de ordem quantitativa para avaliação. Destarte, focando em apenas um componente do SVVE, a presente pesquisa teve como objetivo propor um método de ensaio para verificação dos efeitos da exposição à ação de calor e choque térmico, em argamassas de revestimento vertical externo, a partir de adaptação do ensaio indicado no Anexo E da NBR 15575-4 (ABNT, 2013). Para tal, o programa experimental consistiu, inicialmente, em estudar e propor um método de ensaio adaptado, em escala laboratorial, visando verificar o comportamento de diferentes argamassas de revestimentos frente à ação de calor e choque térmico, bem como avaliar a aplicabilidade do mesmo. Foram empregadas: três formulações de argamassas industrializadas; uma formulação de argamassa simples de cal hidratada com traço em volume de 1:2; e duas formulações de argamassa mista (cal e cimento) com traços em volume de 1:1:6 e 1:2:9. O método proposto consistiu em submeter as argamassas de revestimento, moldadas em corpos de prova prismáticos ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ e $2,5 \times 2,5 \times 28,5 \text{ cm}^3$) a 10 ciclos de ação de calor (aquecimento em estufa à 80°C) e choque térmico (resfriamento em reservatório à 20°C) e, então avaliar os requisitos de desempenho previstos. As argamassas foram avaliadas nos estados fresco e endurecido – aos 28 dias de idade e, posteriormente, aos 42 dias (com e sem ciclagem). Também foi proposto um método para a determinação do coeficiente de dilatação térmica linear de barras de argamassa. Os resultados permitiram concluir que o método proposto degradou as argamassas de revestimento estudadas, alterando as propriedades de: absorção de água por capilaridade e imersão; índice de vazios; resistências mecânicas; módulo de elasticidade dinâmico; resistividade elétrica superficial; dilatação térmica; e variação dimensional. Ademais, o estudo de viabilidade indicou positivamente para implementação do procedimento complementar sob os aspectos técnico, econômico, social e ambiental. As análises evidenciaram a possibilidade de associação da ciclagem de ação de calor e choque térmico à caracterização das argamassas para fins de avaliação dos requisitos e classes de desempenho.

Palavras-chave: Argamassa; Revestimento; Durabilidade; Choque térmico; NBR 15575.

ABSTRACT

The discussion regarding the durability of civil construction buildings has increased due to the recurrent appearance of pathological manifestations. The building facades (SVVE), such as rendering mortar system performed, are subjected to thermal stresses that may impair its performance. Thus, the Brazilian residential buildings performance standardization, NBR 15575-4 (ABNT, 2013), prescribes a test method to "Verification of the behavior of SVVE exposed to heat action and thermal shock", for the purpose of assessing the durability of these systems. However, it is considered complicated in some ways, due to its costs and wastes, besides owning limitations. Ergo, this research aimed to propose a simplified test method, by verifying the behavior of rendering mortars exposed to the heat action and thermal shock, adapting the referred test contained in Annex E of NBR 15575-4 (ABNT, 2013). Therefore, the experimental program consisted in studying and proposing the adapted test method configuration. Thus, three different industrial rendering mortars and three laboratory mixes (1:2; 1:1:6; and 1:2:9 in volume), using lime, cement, sand and water, were carried out. The proposed method consists on leading the rendering mortars, molded in prismatic specimens ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ and $2.5 \times 2.5 \times 28.5 \text{ cm}^3$), to 10 cycles of heat action (by using a laboratory incubator at 80°C) and thermal shock (cooling in water tank at 20°C) and then evaluate the performance requirements. The study also developed a method for determining the coefficient of linear thermal expansion of mortar bars. The mixes were characterized in the fresh and hardened states - at 28 days and, subsequently, at 42 days (with and without ageing). Thereunto, consistency, density, mechanical strength, flexural tensile strength, elastic modulus, superficial electrical resistivity (RES), dimensional variation (shrinkage), capillary and immersion water absorption, voids index and thermal expansion coefficient tests were carried out. A viability study of the proposed procedure application was also employed. The results allowed to conclude that the proposed complementary test method affected the evaluated properties of rendering mortars, and it also indicate implementation viability. The analyzes showed the possibility of associating heat action and thermal shock to the characterization of mortars for the purpose of assessing requirements and determining performance classes.

Keywords: Mortar; Rendering; Durability; Thermal Shock; NBR 15575.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – EXEMPLO DE MANIFESTAÇÃO PATOLÓGICA EM ARGAMASSA DE REVESTIMENTO DE FACHADA (A), COM DESTAQUE ÀS FISSURAS (B).	27
FIGURA 2 – ILUSTRAÇÃO DAS TRANSFERÊNCIAS DE CALOR EM FACHADA AO LONGO DO DIA.....	28
FIGURA 3 – ILUSTRAÇÃO DE VARIAÇÃO DIMENSIONAL EM BARRA DE ARGAMASSA DECORRENTE DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA.	31
FIGURA 4 – PERFIL DE TEMPERATURA AO LONGO DO REVESTIMENTO, DURANTE O RESFRIAMENTO BRUSCO.	33
FIGURA 5 – ESQUEMA DE MONTAGEM E INSTRUMENTAÇÃO DO CORPO DE PROVA DO “ANEXO E” DA NBR 15575-4.	40
FIGURA 6 – ILUSTRAÇÃO DO PRINCÍPIO DO ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA EM QUATRO CASOS DISTINTOS.....	49
FIGURA 7 – FLUXOGRAMA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL DO CAPÍTULO 4	52
FIGURA 8 – FLUXOGRAMA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL DO CAPÍTULO 5	53
FIGURA 9 – FORMULAÇÕES ESTUDADAS NO PROGRAMA EXPERIMENTAL...	56
FIGURA 10 – CURVA GRANULOMÉTRICA DA CAL HIDRATADA (CH-III).	58
FIGURA 11 – CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO.....	59
FIGURA 12 – (A) ESTUFA E (B) RESERVATÓRIO UTILIZADOS NA CICLAGEM..	60
FIGURA 13 – ILUSTRAÇÃO DE LEITURAS DE TEMPERATURA DAS AMOSTRAS EM ESTUFA DAS FACES EXTERNAS (A) E INTERNAS (B), COM RESPECTIVA LINHA DO TEMPO	62
FIGURA 14 – CONTROLE DE TEMPERATURA DE ÁGUA NO INTERIOR DO RESERVATÓRIO.....	64
FIGURA 15 – CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS AO RESFRIAMENTO POR IMERSÃO COMPLETA (RESFRIAMENTO TIPO 1).....	65
FIGURA 16 – CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS AO RESFRIAMENTO POR IMERSÃO PARCIAL (RESFRIAMENTO TIPO 2)	65
FIGURA 17 – ILUSTRAÇÃO DE LEITURA DE TEMPERATURA DOS CP’S EM RESFRIAMENTO TIPO 2.	66

FIGURA 18 – ILUSTRAÇÃO DA SITUAÇÃO DE TEMPERATURA DOS CORPOS DE PROVA DURANTE (A) AQUECIMENTO E (B) RESFRIAMENTO POR IMERSÃO PARCIAL.....	67
FIGURA 19 – GRADIENTES MÉDIOS DE TEMPERATURA PARA O (A) RESFRIAMENTO TIPO 1 E (B) RESFRIAMENTO TIPO 2.....	70
FIGURA 20 – TEMPERATURA MÉDIA AO LONGO DO PROCEDIMENTO COMPLETO DE AÇÃO DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTP	71
FIGURA 21 – MÁXIMO GRADIENTE DE TEMPERATURA DAS ARGAMASSAS AO LONGO DA CICLAGEM DE AÇÃO DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO.....	72
FIGURA 22 – CORRELAÇÃO DO MÁXIMO GRADIENTE DE TEMPERATURA COM (A) DENSIDADE DE MASSA E (B) ÍNDICE DE VAZIOS.....	73
FIGURA 23 – DIAGRAMA SINTÉTICO DE CICLAGEM DO MÉTODO DE ENSAIO ADAPTADO DE AÇÃO DO CALOR E CHOQUE TÉRMICO	75
FIGURA 24 – ESQUEMA DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE.....	82
FIGURA 25 – EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIAS MECÂNICAS EM PRENSA UNIVERSAL (A): TRAÇÃO NA FLEXÃO (B) E COMPRESSÃO AXIAL (C).	83
FIGURA 26 – ESQUEMA DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA (A) E PRINCÍPIOS DE LEITURA (B)	84
FIGURA 27 – ILUSTRAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE DETERMINAÇÃO DE α	87
FIGURA 28 – DENSIDADE DE MASSA APARENTE DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO NO ESTADO ENDURECIDO	95
FIGURA 29 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTOS	96
FIGURA 30 – ÍNDICE DE VAZIOS DAS ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS (CINZA) E TRADICIONAIS (VERMELHO).....	98
FIGURA 31 – CORRELAÇÃO DAS VARIAÇÕES PERCENTUAIS DE ÍNDICE DE VAZIOS E ABSORÇÃO POR IMERSÃO DECORRENTES DA CICLAGEM DAS ARGAMASSAS	99
FIGURA 32 – COEFICIENTE DE CAPILARIDADE E CLASSES DE DESEMPENHO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO.....	100

FIGURA 33 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E CLASSES DE DESEMPENHO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO	101
FIGURA 34 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E CLASSES DE DESEMPENHO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO	102
FIGURA 35 – CORRELAÇÃO ENTRE VARIAÇÃO PERCENTUAL DE RESISTÊNCIAS MECÂNICAS DECORRENTE DO CHOQUE TÉRMICO.....	104
FIGURA 36 – MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO	105
FIGURA 37 – CORRELAÇÃO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS E TRADICIONAIS	106
FIGURA 38 – CORRELAÇÃO ENTRE A VARIAÇÃO ABSOLUTA DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO E ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO.....	107
FIGURA 39 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO	108
FIGURA 40 – CORRELAÇÃO ENTRE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL E COEFICIENTE DE CAPILARIDADE	109
FIGURA 41 – CORRELAÇÃO ENTRE VARIAÇÃO PERCENTUAL EM MÓDULO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL E ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO COMO CONSEQUÊNCIA DO CHOQUE TÉRMICO	110
FIGURA 42 – VARIAÇÃO DIMENSIONAL DAS ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS	110
FIGURA 43 – VARIAÇÃO DIMENSIONAL DAS ARGAMASSAS TRADICIONAIS	111
FIGURA 44 – DILATAÇÃO TÉRMICA DAS ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS	115
FIGURA 45 – DILATAÇÃO TÉRMICA DAS ARGAMASSAS TRADICIONAIS	115
FIGURA 46 – COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO	116
FIGURA 47 – CORRELAÇÃO ENTRE COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA, ÍNDICE DE VAZIOS E MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS	117

FIGURA 48 – CORRELAÇÃO ENTRE COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA, ÍNDICE DE VAZIOS E MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA ARGAMASSAS TRADICIONAIS.....	117
FIGURA 49 – TENSÃO TÉRMICA DE TRAÇÃO ESTIMADA E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO	118

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – RESUMO DE ESTUDOS RELACIONADOS AO CHOQUE TÉRMICO E PARÂMETROS ADOTADOS	36
TABELA 2 – COMPARATIVO ENTRE ENSAIOS DE CHOQUE TÉRMICO DA NBR 15575 E NORMAS INTERNACIONAIS.....	42
TABELA 3 – REQUISITOS DA NBR 13281 (ABNT, 2005)	45
TABELA 4 – REQUISITOS DA NBR 16648 (ABNT, 2018) NO ESTADO FRESCO .	46
TABELA 5 – REQUISITOS DA NBR 16648 (ABNT, 2018) NO ESTADO ENDURECIDO	46
TABELA 6 – CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO QUANTO À SUSCETIBILIDADE À FISSURAÇÃO.....	47
TABELA 7 – VARIÁVEIS INDEPENDENTES E PARÂMETROS FIXOS DA PESQUISA.....	54
TABELA 8 – VARIÁVEIS DEPENDENTES DA PESQUISA.....	54
TABELA 9 – CONSUMO DE MATERIAIS (kg/m ³) DAS ARGAMASSAS	56
TABELA 10 – PROPRIEDADES FÍSICAS DO CIMENTO CP II-F-32	57
TABELA 11 – CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO CIMENTO CP II-F-32	57
TABELA 12 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CIMENTO CP II-F-32.....	58
TABELA 13 – PROPRIEDADES FÍSICAS DA CAL HIDRATADA CH-III	58
TABELA 14 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO AGREGADO MIÚDO.	59
TABELA 15 – MEDIDAS DE TEMPERATURA AO LONGO DA ETAPA DE AQUECIMENTO PARA AS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO ...	68
TABELA 16 – MEDIDAS DE TEMPERATURA AO LONGO DA ETAPA DE RESFRIAMENTO TIPO 1 (IMERSÃO COMPLETA) PARA AS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO	69
TABELA 17 – MEDIDAS DE TEMPERATURA AO LONGO DA ETAPA DE RESFRIAMENTO TIPO 2 (IMERSÃO PARCIAL) PARA AS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO	69
TABELA 18 – COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DE CICLAGEM DE AÇÃO DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO PROPOSTO E O NORMATIZADO .	76
TABELA 19 – VARIÁVEIS INDEPENDENTES E PARÂMETROS FIXOS DA PESQUISA.....	78
TABELA 20 – VARIÁVEIS DEPENDENTES DA PESQUISA.....	78

TABELA 21 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	80
TABELA 22 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO NO ESTADO ENDURECIDO	81
TABELA 23 – LEITURAS AO LONGO DO ENSAIO DE VERIFICAÇÃO DA DILATAÇÃO TÉRMICA.....	87
TABELA 24 – ENSAIOS PARA VERIFICAÇÃO DO EFEITO DA CICLAGEM DE AÇÃO DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO AOS 42 DIAS DE IDADE	90
TABELA 25 – CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO ..	93
TABELA 26 – DEGRADAÇÃO (VARIAÇÃO PERCENTUAL) DAS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO AOS 42 DIAS DE IDADE DECORRENTE DO CHOQUE TÉRMICO	103
TABELA 27 – AVALIAÇÃO QUANTO À SUSCETIBILIDADE À FISSURAÇÃO DAS ARGAMASSAS AOS 42 DIAS DE IDADE COM E SEM CICLAGEM	113
TABELA 28 – DEGRADAÇÃO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO AOS 42 DIAS DE IDADE DECORRENTE DO CHOQUE TÉRMICO	120
TABELA 29 – ESTIMATIVA DE VOLUME DE DESCARTE DECORRENTE DO MÉTODO PROPOSTO PARA CADA AMOSTRA ENSAIADA.....	121
TABELA 30 – ORÇAMENTO PARA EXECUÇÃO DO PROCEDIMENTO DE ENSAIO DE AÇÃO DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO DA NBR 15575-4 (ABNT, 2013)	VI
TABELA 31 – ORÇAMENTO PARA EXECUÇÃO DO PROCEDIMENTO DE ENSAIO DE AÇÃO DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO PROPOSTO PARA ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO	VII

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	- Relação água/cimento
a/ms	- Relação água/materiais secos
CP	- Corpo de prova
CET	- Coeficiente de expansão (dilatação) térmica
I-A	- Formulação de argamassa industrializada A
I-B	- Formulação de argamassa industrializada B
I-C	- Formulação de argamassa industrializada C
LAME	- Laboratório de materiais e estruturas da UFPR
LATECA	- Laboratório de tecnologia de argamassas
M-1	- Formulação de argamassa mista; traço 1:1:6 (cimento:cal:areia), em volume
M-2	- Formulação de argamassa mista; traço 1:2:9 (cimento:cal:areia), em volume
NBR	- Norma técnica brasileira
ORSE	- Orçamento de Obras de Sergipe (base de dados)
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
PPGECC	- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil
RES	- Resistividade elétrica superficial
S-C	- Formulação de argamassa simples; traço 1:2 (cal:areia), em volume
SINAPI	- Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
SVVE	- Sistema de vedação vertical externo
SVVIE	- Sistemas de vedação vertical interno e externo

LISTA DE SÍMBOLOS

α : coeficiente de dilatação térmica linear ($^{\circ}\text{C}^{-1}$);
 ΔL : variação dimensional linear (mm);
 ΔT : variação de temperatura ($^{\circ}\text{C}$);
 E : módulo de elasticidade (MPa);
 E_d : Módulo de elasticidade dinâmico (MPa);
 ε : Deformação específica (dilatação/expansão térmica específica)
 L_0 : Leitura de comprimento no instante 0 (mm);
 L_n : Leitura de comprimento no instante “n” (mm);
®: marca registrada;
 τ : tensão de tração normal (MPa);
 T_s : temperatura superficial ($^{\circ}\text{C}$);
 T_i : temperatura interna ($^{\circ}\text{C}$);
 T_0 : Leitura de temperatura no instante 0 ($^{\circ}\text{C}$);
 T_n : Leitura de temperatura no instante “n” ($^{\circ}\text{C}$);
 ν : coeficiente de Poisson ($\approx 0,2$);
 μ : Velocidade de propagação da onda ultrassônica (mm/ μs);
 ρ : Densidade de massa aparente do corpo de prova (kg/m^3).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVO	20
1.2	JUSTIFICATIVA.....	20
1.2.1	Técnica	20
1.2.2	Econômica e Social	21
1.2.3	Ambiental.....	22
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	24
2.1	SOLICITAÇÕES TÉRMICAS EM REVESTIMENTOS.....	26
2.1.1	Choque térmico	27
2.1.2	Conceitos termofísicos	29
2.1.2.1	Absortância e refletância	29
2.1.2.2	Condutividade térmica	29
2.1.2.3	Capacidade térmica.....	30
2.1.2.4	Calor específico	30
2.1.2.5	Dilatação térmica	30
2.1.2.6	Tensão térmica	32
2.2	ENSAIOS ACELERADOS DE CHOQUE TÉRMICO	34
2.3	NORMA DE DESEMPENHO (NBR 15575)	37
2.3.1	Parte 4 (SVVIE) – ação de calor e choque térmico	38
2.3.2	Normas internacionais – contexto.....	41
2.4	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ARGAMASSAS	43
2.4.1	Requisitos normativos	44
2.4.2	Suscetibilidade à fissuração	46
2.4.2.1	Retração por secagem	47
2.4.2.2	Deformabilidade e propagação de onda ultrassônica.....	48
2.4.2.3	Resistividade elétrica superficial.....	49
3	ESTRUTURA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	51
4	DEFINIÇÃO DO MÉTODO ADAPTADO DE AÇÃO DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO.....	54
4.1	VARIÁVEIS DA PESQUISA	54
4.2	FORMULAÇÕES	55
4.3	MATERIAIS	56

4.3.1	Água de amassamento	57
4.3.2	Aglomerantes	57
4.3.2.1	Cimento Portland	57
4.3.2.2	Cal Hidratada	58
4.3.3	Agregado miúdo	58
4.3.4	Argamassas industrializadas	59
4.4	MÉTODOS	60
4.4.1	Etapa 1 - Aquecimento (ação de calor)	61
4.4.2	Etapa 2 - Resfriamento (choque térmico)	63
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.5.1	Etapa 1 - Aquecimento (ação de calor)	67
4.5.2	Etapa 2 - Resfriamento (choque térmico)	68
4.5.3	Método proposto	74
4.6	CONCLUSÕES	76
5	APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO	78
5.1	VARIÁVEIS DA PESQUISA	78
5.2	FORMULAÇÕES	79
5.3	MATERIAIS	79
5.4	MÉTODOS	79
5.4.1	Caracterização no Estado fresco	80
5.4.2	Caracterização no Estado endurecido	80
5.4.2.1	Absorção de água por imersão e índice de vazios	81
5.4.2.2	Absorção por capilaridade	82
5.4.2.3	Resistências mecânicas	82
5.4.2.4	Módulo de elasticidade dinâmico	83
5.4.2.5	Resistividade elétrica superficial	84
5.4.2.6	Variação dimensional	85
5.4.2.7	Dilatação térmica	86
5.4.3	Efeito da ação de calor e choque térmico	89
5.4.4	Análise estatística	90
5.4.5	Estudo de viabilidade	91
5.5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	93
5.5.1	Caracterização no estado fresco	93

5.5.2	Caracterização no estado endurecido e efeito da ação de calor e choque térmico	94
5.5.2.1	Densidade de massa aparente	94
5.5.2.2	Absorção por imersão e índice de vazios	96
5.5.2.3	Absorção por capilaridade	99
5.5.2.4	Resistências mecânicas	101
5.5.2.5	Módulo de elasticidade dinâmico	104
5.5.2.6	Resistividade elétrica superficial	107
5.5.2.7	Variação dimensional	110
5.5.2.8	Dilatação térmica	114
5.5.3	Estudo de viabilidade	118
5.5.3.1	Viabilidade técnica	119
5.5.3.2	Viabilidade ambiental	121
5.5.3.3	Viabilidade socioeconômica	121
5.6	CONCLUSÕES	123
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	125
6.1	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	125
	REFERÊNCIAS	127
	APÊNDICE 1	I
	APÊNDICE 2	VI
	APÊNDICE 3	VI
	APÊNDICE 4	XI
1.	DENSIDADE DE MASSA APARENTE NO ESTADO ENDURECIDO	XII
2.	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO	XVI
3.	ÍNDICE DE VAZIOS	XX
4.	COEFICIENTE DE CAPILARIDADE	XXIV
5.	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	XXVIII
6.	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	XXXII
7.	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO	XXXVI
8.	RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL (RES)	XL
9.	VARIAÇÃO DIMENSIONAL	XLIV

1 INTRODUÇÃO

Problemas relacionados à durabilidade das obras de engenharia são recorrentes na construção civil. Frequentemente os diversos elementos que compõem uma edificação apresentam manifestações patológicas, podendo causar problemas de ordem estética, que implicam desde o desconforto ao usuário até o comprometimento do desempenho.

Embora o estudo da durabilidade se configure como um tópico em voga, nota-se na literatura um certo direcionamento do mesmo às estruturas de concreto, sem, algumas vezes, dar devida atenção aos demais elementos que compõem uma edificação. Os revestimentos de argamassa, por exemplo, também apresentam relevância, levando em consideração sua recorrente presença nas edificações brasileiras, por questões culturais dos métodos construtivos empregados usualmente. Conforme afirma Paravisi (2008), o sistema de revestimento de argamassa é o mais utilizado no mercado brasileiro.

Na esfera nacional, a preocupação com o tema da durabilidade adquiriu ênfase, como o advento da NBR 15575 – norma de desempenho de edificações (ABNT, 2013a). Dentre as seis partes que compõem a norma, a parte 4 diz respeito aos “sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE”, a qual compreende os revestimentos de argamassa em fachadas (paredes externas).

O procedimento de ensaio para avaliação de uma parte destes requisitos, no caso de sistemas de vedação externa, é dado pelo Anexo E da referida norma, referente ao desempenho quanto à durabilidade. Contudo, tal como será demonstrado ao longo deste trabalho, o ensaio aqui abordado pode ser considerado limitado quanto a aspectos de ordem técnica, ambiental e economicamente, em decorrência das dimensões das amostras, equipamentos necessários, custos associados e geração de resíduos. Além disso, a avaliação resultante deste procedimento é parcialmente empírica e associada à avaliação visual.

Por conseguinte, o aprimoramento do ensaio em termos de avaliação dos requisitos de durabilidade, buscando concomitantemente reduzir custos e impacto ambiental, é interessante sob as óticas técnica, socioeconômica e ecológica. Destarte, demandam-se pesquisas sobre tal.

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo propor um método de ensaio para a verificação do comportamento de argamassas de revestimento vertical externo expostas à ação de calor e choque térmico, a partir de adaptação do ensaio indicado no Anexo E da Norma de Desempenho - NBR 15575-4 (ABNT, 2013). Ao final, propõe-se ainda desenvolver uma cartilha, nos moldes de instruções normativas técnicas, dos procedimentos propostos, apresentando as diretrizes deles.

1.2 JUSTIFICATIVA

A justificativa do presente estudo consiste em vertentes de ordem técnica, econômica, social e ambiental – tal como explanado adiante.

1.2.1 Técnica

Quanto à questão técnica, destaca-se que o ensaio indicado no Anexo E da NBR 15575-4 (ABNT, 2013b) possui algumas limitações e, para tais, encontram-se na literatura diversos questionamentos sobre o mesmo (LORENZI, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2014; KAZMIERCZAK *et al.*, 2016; FERNANDES, 2017; FONTENELLE *et al.*, 2017), dentre os quais ressalta-se, neste ponto, a avaliação parcialmente qualitativa (empírica e visual) para fins de resultados quanto à durabilidade. Cabe destacar também a falta de especificação de alguns parâmetros e procedimentos a serem realizados ao longo do ensaio, tais como a transição entre as ciclagens, temperatura da água utilizada para resfriamento, entre outros.

Portanto, do ponto de vista técnico, é possível – por meio do método proposto no presente estudo – galgar desenvolvimento que permita evoluir, dentro dos aspectos mencionados, o ensaio para avaliação da ação do calor e choque térmico – no que tange aos revestimentos de argamassa do SVVE.

Ademais, os fenômenos relacionados ao choque térmico possuem lacunas no que tange aos efeitos práticos deste sobre o desempenho do componente argamassa de revestimento. Desta forma, a verificação do comportamento destes compósitos de forma isolada é benéfica sob o aspecto do conhecimento científico.

1.2.2 Econômica e Social

Ainda sobre o procedimento de ensaio contido na norma de desempenho, afirma-se que o mesmo possui elevado custo para sua execução, tanto em quantidade de material quanto em valor de equipamentos. Explica-se que para a execução do ensaio são necessários: 5 (cinco) termopares; 1 (um) defletômetro; 1 (um) pórtico estruturado que permita a construção do elemento e fixação rotulada em face superior; painel radiante; dispositivo de aspersão de água com vazão controlada; dentre outros. Ademais, destaca-se que esses elementos são necessários para a execução de apenas uma amostra do elemento ensaiado, ou seja, uma parede acabada com os mesmos detalhes construtivos empregados em obra.

Destarte, além dos equipamentos de ensaio elencados anteriormente, nota-se que há demanda de elevada quantidade de material para o ensaio (1,15 m³, considerando dois corpos de prova exigidos como amostra mínima). Por conseguinte, infere-se que, tal como supracitado, a execução do ensaio implica em elevado custo – tanto para aquisição de equipamentos ou contratação de laboratório especializado quanto para quantidade de material necessária para tal.

Também por este motivo, há pouca adesão quanto à realização do mesmo, tanto no cenário de pesquisas quanto no mercado. Sobre este fato, contactou-se inclusive uma empresa da região, desenvolvedora de argamassas e cimentos, que confirmou a dificuldade de implementação deste ensaio – pelas mesmas razões aqui discutidas. Ainda em contato com referida empresa, foi informado que a mesma aplica este procedimento de ensaio com algumas adaptações, buscando tornar sua execução mais viável. Dessa forma, com baixa adesão, infelizmente, não há o controle esperado sobre o desempenho dos materiais utilizados e, consequentemente, sobre a durabilidade do sistema. Portanto, fazem-se necessárias pesquisas que permitam aprimorar o referido procedimento normativo quanto às limitações descritas.

Sob o aspecto econômico e social, é notório que – em decorrência da ausência de manutenção preventiva e aplicação correta dos materiais de construção civil – a degradação de edifícios e seus componentes apresenta-se como um problema complexo (SILVA *et al.*, 2014). Não obstante, gastos com reparos, manutenções e demais intervenções apresentam-se como um fator

significativo sob o ponto de vista econômico. Ademais, conforto e segurança, também relacionados ao conceito de durabilidade, contribuem positivamente para com a sociedade de modo geral. Quando medidas corretas e necessárias não são empregadas, seja durante a execução ou ao longo do uso, o desempenho da edificação é afetado, de modo que os requisitos mínimos deixem de ser cumpridos ao longo do tempo, comprometendo sua vida útil (HALLBERG, 2009). Portanto, afirma-se que o estudo do desempenho relacionado à durabilidade de materiais de construção possui significativa importância, também, quanto às vertentes econômica e social, haja vista que pode contribuir positivamente para com os mesmos.

1.2.3 Ambiental

Sob a ótica ecológica, tal como amplamente difundido, sabe-se que a indústria da construção civil, devido ao fato de ser uma grande consumidora de recursos e geradora de resíduos, implica em um enorme impacto ambiental – o que se agrava levando em conta que a sua cadeia produtiva é uma das maiores da economia. Dessa forma, reduzir desperdícios e tornar sua aplicação mais consciente – por meio de maiores conhecimentos técnicos sobre o referido material – resultaria na redução do impacto ambiental (FRANCIS; THOMAS, 2019; RUIZ *et al.*, 2019; TAMANNA *et al.*, 2019; MOHAJERANI *et al.*, 2020).

Para reforçar a afirmação precedente, destaca-se que a indústria cimenteira, no Brasil, é responsável por cerca de 2% de todas as emissões líquidas de CO₂ produzido pelo ser humano (MCTIC, 2016), atingindo mais de 54 milhões de toneladas de cimento produzidas em 2017 (SNIC, 2017). Com ênfase, Scrivener *et al.* (2018) estimam que 40% do montante de consumo de cimento brasileiro é relacionado a argamassas. As emissões de CO₂ provenientes do cimento Portland surgem devido ao consumo de combustíveis fósseis, energia elétrica e à decomposição do calcário (VAN DEVENTER *et al.*, 2012; TAMANNA *et al.*, 2019). De acordo com Mahayuddin e Zaharuddin (2013), a indústria da Construção Civil é a maior consumidora de recursos naturais, correspondendo a cerca 75% do total, figurando entre as maiores poluidoras no que tange à geração de resíduos. As argamassas, por si só, ultrapassam 60% dos referidos resíduos.

Por conseguinte, o conceito de durabilidade, conferindo redução de consumo de materiais ao longo do tempo, contribui positivamente sob a ótica ecológica. Outrossim, sabe-se que a geração de resíduos da indústria da construção civil, aliada ao seu posterior descarte, figura entre os principais problemas enfrentados pela gestão ambiental. Tal impacto está correlacionado, também, ao uso de recursos naturais não renováveis (LÓPEZ RUIZ *et al.*, 2019; TAMANNA *et al.*, 2019).

2 REVISÃO DE LITERATURA

Os diversos materiais empregados na construção civil sofrem, inevitavelmente ao longo da vida útil, degradações provocadas por diferentes agentes, sejam eles naturais ou não. Assim, tais fenômenos ocorrem por meio da interação entre o próprio material e o ambiente em que está inserido, resultando em alterações deletérias às propriedades do referido elemento. Portanto, faz-se necessário que as edificações e seus sistemas sejam capazes de suportar a tais degradações, evitando ocorrência de manifestações patológicas prematuras (MEHTA; MONTEIRO, 2006; MAIA *et al.*, 2019).

Sabe-se que a variação de temperatura e umidade se apresenta como agente agressivo aos revestimentos de edifícios, provocando variações físicas e químicas nos seus componentes, decorrentes das solicitações de origem térmica, radiação solar e variação de umidade. Tais fenômenos podem resultar em fissuras, deslocamentos, entre outras manifestações patológicas. Essa situação é agravada em revestimentos verticais externos, que estão mais expostos a essas variações e solicitações. Assim, o conceito de durabilidade é fundamental para a avaliação do desempenho (CONSOLI, 2006; ABCB, 2006; MAIA *et al.*, 2019).

Isto posto, em decorrência de as superfícies das vedações externas de uma edificação, tal qual as fachadas de argamassa, estarem sujeitas a variações sazonais de temperatura que promovem variações dimensionais em elementos cuja deformação está restringida, de forma externa (interface entre diferentes camadas) ou interna (próprio elemento), ocorre surgimento de tensões que podem implicar em degradações. Assim, as movimentações decorrentes de solicitações térmicas estão associadas também às propriedades físicas dos materiais envolvidos (THOMAZ, 1989).

No Brasil, o clima regional pode refletir em temperaturas médias anuais consideradas elevadas. Igualmente, a umidade relativa e a precipitação de chuvas podem atingir índices altos, condições que exercem influência sobre os processos de degradação dos materiais aplicados na construção civil. Portanto, tanto variação de temperatura, agravada pela radiação solar, quanto o fenômeno de precipitação de chuva se apresentam como agentes causadores de degradação dos revestimentos externos de uma edificação (BAUER, 1987).

Além disso, diversos estudos – tais como Bauer (1987), Giongo (2007), Melo Júnior, (2010), Giongo et al (2011), Poyastro (2011) e Freitas (2011) – também apontam o efeito da ação do vento como meio de degradação de fachadas de edifícios, que pode ser agravado em situações onde este está associado à precipitação de chuva, de modo que ambos ocorrem simultaneamente. Este fenômeno é denominado chuva dirigida. Por conseguinte, a durabilidade de revestimentos externos depende também da exposição a tais solicitações. Assim sendo, Freitas (2011) comenta que a orientação crítica da fachada é determinada pela incidência de chuva dirigida combinada com a radiação solar.

Sob esta ótica, infere-se que os projetos de edifícios que contemplem meios de evitar ou reduzir a exposição dos elementos às solicitações de origem higrotérmica, podem resultar em benefícios quanto à durabilidade de fachadas. Contudo, reconhece-se que nem sempre é possível evitar que as solicitações ocorram. Por isso, faz-se necessário que o elemento seja projetado de maneira adequada às solicitações que lhe serão impostas, visando conservar seu desempenho em uso e, por conseguinte, manter-se íntegro e durável.

Na esfera nacional, as argamassas de revestimento estão frequentemente presentes nas edificações, seja para vedações verticais em paredes internas ou em fachadas externas. A preponderância da escolha dessa solução em relação às demais pode ser atribuída ao seu baixo custo e, também, à cultura dos métodos construtivos empregados no Brasil, herdada parcialmente dos portugueses. Desse modo, é fundamental entender comportamento dos materiais que compõe a formulação da argamassa de revestimento que será aplicada para fins de revestimento vertical externo (fachada). De forma geral, as formulações básicas (tradicionais) de argamassas aplicadas para revestimento empregam em sua constituição: cimento; cal; areia e água – cujas implicações sobre as propriedades da argamassa são mais conhecidas.

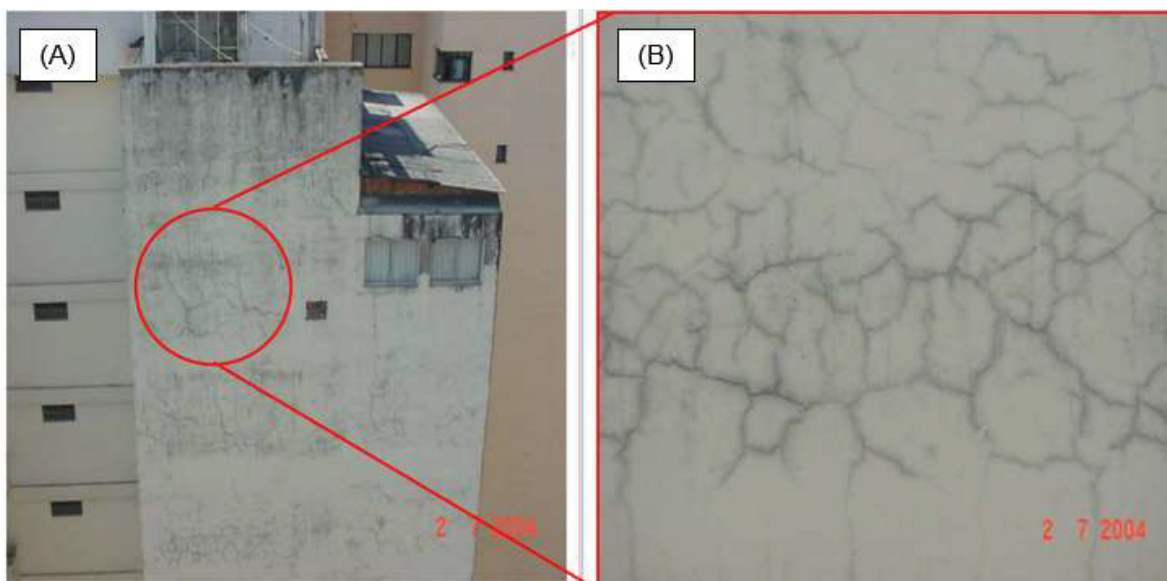
O cimento é considerado o principal aglomerante em termos de resistência, porém, pode carregar consigo uma elevada rigidez. Para argamassas de revestimento, um elevado módulo de deformação, usualmente presente em componentes de resistências mais altas, pode resultar em prejuízo ao desempenho. Portanto, para minimizar este efeito, é comum utilizar adição de cal hidratada na mistura que aumenta a capacidade de deformação da argamassa, mas, por outro lado, diminui a resistência mecânica. Assim, é possível obter resultados positivos

quanto à vida útil do revestimento, em decorrência das solicitações que este elemento está sujeito em uso (SABBATINI, 1981; JOHN, 2003). Quanto ao agregado miúdo, geralmente emprega-se areia, sendo que sua distribuição granulométrica e módulo de finura possuem influência no desempenho da argamassa no estado endurecido no que tange à fissuração, rugosidade, permeabilidade e resistência mecânica (ANGELIM et al., 2013).

2.1 SOLICITAÇÕES TÉRMICAS EM REVESTIMENTOS

O estudo da durabilidade de fachadas possui um viés importante frente aos ciclos de aquecimento e resfriamento, especialmente quando estes ocorrem de forma brusca, que retratam os choques térmicos. Essa solicitação é decorrente das condições climáticas e seus respectivos fenômenos, particulares em cada região, tal como: radiação solar e precipitação de chuva; de modo que esses ciclos naturais de variação de condições higrotérmicas sejam essenciais no efetivo desempenho de revestimentos externos em sua vida útil. Em uma situação real, a diferença de temperatura entre a superfície do sistema de revestimento e seu interior, associada às restrições de movimentação, pode provocar tensões de elevada magnitude, resultando em manifestações patológicas (FIGURA 1), tais como fissuração, deslocamento, descolamento, entre outros – comprometendo seu desempenho. Esses efeitos tendem a ser mais expressivos em sistemas leves (baixa inércia térmica) e em sistemas compostos por várias camadas, com elementos não homogêneos – tal como ocorre nas diversas camadas que compõem o SVVE (ESQUIVEL, 2009; OLIVEIRA *et al.* 2014; BOCHEN, 2015).

FIGURA 1 – EXEMPLO DE MANIFESTAÇÃO PATOLÓGICA EM ARGAMASSA DE REVESTIMENTO DE FACHADA (A), COM DESTAQUE ÀS FISSURAS (B).



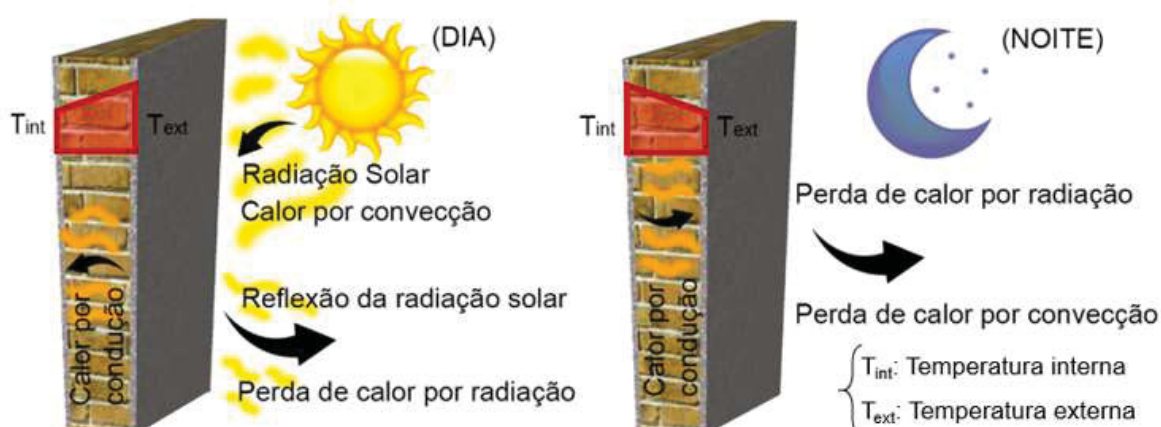
FONTE: Adaptado de Sahade (2005).

2.1.1 Choque térmico

O conceito de choque térmico está associado à taxa e amplitude da variação de temperatura em períodos curtos de tempo em decorrência de variações bruscas de temperatura. Difere-se, portanto, das convencionais movimentações térmicas decorrentes das transferências de calor que podem ocorrer, onde a variação se dá de forma mais amena, resultando em menor solicitação térmica ao elemento (GOLDBERG, 1998; BARBOSA; 2013).

Exemplificando, sabe-se que ao longo de um dia de exposição à radiação solar, a fachada de uma dada edificação é aquecida, a partir de sua face externa até seu interior, e – ao anoitecer – inicia-se o seu resfriamento, da mesma forma. Assim, tal variação cíclica de temperatura – com ou sem a ocorrência de resfriamento brusco (geralmente relacionado a chuvas) – está associada ao surgimento de tensões decorrentes de deformações térmicas, sem a ocorrência do choque térmico especificamente. O processo periódico de transferências de calor que ocorre em uma fachada está representado pela FIGURA 2.

FIGURA 2 – ILUSTRAÇÃO DAS TRANSFERÊNCIAS DE CALOR EM FACHADA AO LONGO DO DIA



FONTE: Adaptado de Esquivel (2009).

Na prática, o choque térmico ocorre em revestimentos comumente em situações onde, após passar por um período de aquecimento prévio por radiação solar (ou até mesmo outro motivo), ocorre a precipitação de chuva. Assim, a superfície aquecida da fachada, por exemplo, é bruscamente resfriada pela ação da chuva, gerando gradientes térmicos entre a face externa e o interior do elemento, os quais resultam no choque térmico. Tal fenômeno pode desencadear a ocorrência de fadiga do revestimento, comprometendo – deste modo – sua integridade e, por conseguinte, sua durabilidade (BOCHEN, 2009; ESQUIVEL, 2009; BOCHEN, 2015; JOSHAGHANI *et al.*, 2018).

Contudo, para que ocorram solicitações de origem térmica no material, também é necessário que haja restrições que impeçam, de algum modo, o revestimento de se movimentar livremente. Segundo Neville e Brooks (2013), as restrições podem ser de ordem interna ou externa. No caso das restrições internas, há um gradiente de temperatura no próprio elemento, de modo que o próprio material denota restrições de movimentação para si. As restrições externas dizem respeito aos elementos adjacentes que impedem, de alguma forma, a movimentação. Dirkx e Grégoire (2012) afirmam que sistemas multicamadas – tal qual o SVVE –, onde diferentes materiais encontram-se aderidos, são exemplos de situações onde ocorre restrição externa. Além disso, levando em conta a variável espessura que uma camada de revestimento de argamassa pode possuir, a restrição interna também ocorre, haja vista que haverá um gradiente térmico neste

elemento do sistema, entre sua face externa e seu interior, e – por conseguinte – deformações diferenciais.

Conforme pontuou Esquivel (2009), a resposta de um dado elemento ao choque térmico é condicionada às suas condições de contorno. Portanto, se houver restrições – internas ou externas – o estado de tensões é agravado. Por outro lado, se a exposição ao calor for simétrica em todo o elemento, a transferência de calor ocorrerá até que este atinja o equilíbrio térmico. Ou seja, a temperatura será a mesma em todo o elemento, momento em que não haverá gradiente térmico.

Além das condições de contorno que interferem nas solicitações de ordem térmica, Ignatiev e Chartterji (1992) afirmam que as tensões nos revestimentos são influenciadas pelo seu módulo de deformação, o qual é, geralmente, inferior ao módulo do substrato, decorrente da espessura da camada de argamassa e do nível de fissuração, normalmente condicionado à retração por secagem do revestimento. Em termos de restrição interna, pode-se inferir que quão menor for o módulo de deformação de um dado material, este apresentará menores tensões decorrentes da deformação térmica e, portanto, melhor desempenho frente a estas solicitações.

Para avaliar o desempenho das argamassas de revestimento frente às solicitações de ordem térmica, faz-se necessário conhecer alguns conceitos termofísicos, explanados na sequência.

2.1.2 Conceitos termofísicos

2.1.2.1 Absortância e refletância

A radiação solar que incide sobre o planeta Terra é absorvida por distintas superfícies, causando uma elevação de temperatura nas mesmas, tal qual ocorre em revestimentos verticais externos. As argamassas de revestimento aplicadas nesses elementos, consideradas como corpos opacos, quando submetidas à incidência de radiação solar, absorvem apenas parte da energia incidente, de modo que a outra parcela é refletida ao meio. As propriedades que regem a ocorrência deste fenômeno são absortância e refletância, respectivamente (RORIZ, 2008).

2.1.2.2 Condutividade térmica

Outro conceito importante, em termos termofísicos, é a condutividade térmica, definida como o fluxo de calor transferido por unidade de espessura e unidade de gradiente de temperatura. Em suma, é a capacidade de um dado material conduzir calor. Materiais que apresentam alta condutividade térmica são denominados condutores térmicos; em contrapartida, materiais de baixa condutividade térmica são isolantes térmicos. Materiais porosos geralmente são bons isolantes, pois o ar possui baixa condutividade. Por conseguinte, é possível assimilar uma relação diretamente proporcional entre a massa específica de um dado material com sua condutividade térmica (RORIZ, 2008).

2.1.2.3 Capacidade térmica

A capacidade térmica é definida, pela NBR 15220-1 (ABNT, 2005), como a quantidade de calor necessária para alterar em uma unidade a temperatura de um componente. A espessura, o calor específico e a densidade de massa são diretamente proporcionais à capacidade térmica. Destaca-se, ainda, que para um sistema multicamadas, tal qual ocorre em SVVIE, a obtenção de sua capacidade térmica é realizada através do somatório das capacidades térmicas dos componentes que o constituem.

2.1.2.4 Calor específico

O calor específico de um material, submetido a pressão constante, equivale a energia necessária para variar um grau de temperatura da unidade de massa desse material. Deste modo, destaca-se que esta propriedade está correlacionada com o tempo necessário para equalização de temperaturas de um dado material, quando este sofre uma solicitação térmica (variação de temperatura) em uma de suas faces, por exemplo (HALL; ALLINSON, 2008).

2.1.2.5 Dilatação térmica

Por outro lado, ao passo que um material sofre um incremento de temperatura, ocorrerá uma expansão deste, implicando em uma variação linear, a qual é proporcional ao seu coeficiente de dilatação térmica linear (α). Fiorito (1994) explica tal comportamento por meio da EQUAÇÃO 1, onde α representa a

proporcionalidade da variação dimensional decorrente de uma dada variação de temperatura. Conforme constatado por Kingery (1955), tais alterações dimensionais podem resultar em tensões, as quais são denominadas tensões térmicas. A FIGURA 3 ilustra tal fenômeno.

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

EQUAÇÃO 1

Onde:

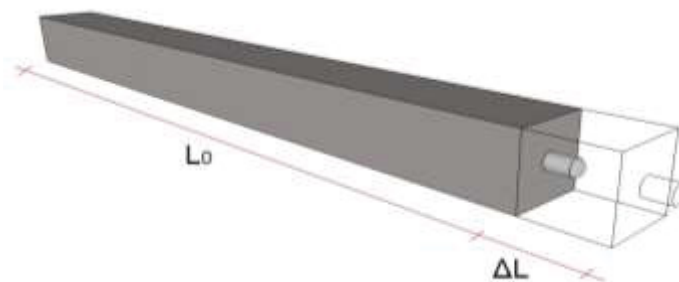
ΔL : variação linear (mm);

L_0 : comprimento inicial (mm);

α : coeficiente de dilatação térmica linear ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

ΔT : variação de temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

FIGURA 3 – ILUSTRAÇÃO DE VARIAÇÃO DIMENSIONAL EM BARRA DE ARGAMASSA DECORRENTE DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA.



FONTE: O autor (2020).

Alguns autores também empregam a nomenclatura “coeficiente de expansão térmica” (CET) para se referir ao coeficiente de dilatação térmica (SCHULSON; SWAINSON; HOLDEN, 2001; KAZMIERCZAK *et al.*, 2016). Os constituintes da pasta de cimento possuem diferentes valores de CET. O valor do coeficiente de dilatação térmica varia para cada argamassa. Alguns autores realizaram estudos com intuito de mapear a abrangência destes valores. Fiorito (1994) constatou que α varia de 10 a $12 \times 10^{-6} ^{\circ}\text{C}^{-1}$. Já Ransom (1987) obteve um intervalo mais abrangente: 9 a $13 \times 10^{-6} ^{\circ}\text{C}^{-1}$. Posteriormente, por meio experimental, Saraiva (1998), Melo (2002) e Childs (2007) obtiveram valores semelhantes: 10 a $13 \times 10^{-6} ^{\circ}\text{C}^{-1}$ (ESQUIVEL, 2009). Além disso, pastas de cimento podem atingir valores da ordem de 15 a $20 \times 10^{-6} ^{\circ}\text{C}^{-1}$ (MEYERS, 1940), enquanto valores para

agregados variam de 5 a $12 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (GHABEZLOO, 2011). Portanto, o CET é um parâmetro fundamental para se determinar a tensão interna entre as diferentes fases de materiais à base de cimento e possibilita prever possíveis danos induzidos pelas diferentes dilatações térmicas de cada fase.

Tendo em vista que a argamassa é uma mistura de diferentes insumos, seu coeficiente de dilatação térmica varia conforme os materiais e proporções empregados em sua formulação. Conforme a Associação do Cimento Portland (1982), um dos fatores mais relevantes para determinação do coeficiente de dilatação térmica da argamassa é a proporção de quartzo no agregado, de modo que quanto maior for o conteúdo de quartzo, maior será o coeficiente. Neville e Brooks (2013) destacam que os agregados podem, tal qual ocorre no fenômeno da retração por secagem, restringir as variações volumétricas dos compósitos cimentícios decorrentes de mudanças de temperatura.

Além dos fatores intrínsecos aos constituintes da argamassa, outro aspecto que afeta o coeficiente de dilatação térmica é a umidade (MARSHALL, 1972; EMANUEL; HULSEY, 1977; PCA, 1982; ESQUIVEL, 2009; NEVILLE; BROOKS, 2013). Segundo os autores, a influência da umidade do revestimento decorre de o coeficiente de dilatação térmica possuir dois componentes principais. O primeiro denomina-se coeficiente térmico verdadeiro, gerado pela movimentação molecular da pasta. O segundo, por sua vez, é chamado de coeficiente de dilatação higrotérmica, que é resultado do acréscimo de pressão de vapor d'água no interior do revestimento – por conta do aumento da temperatura. Aliás, Neville e Brooks (2013) afirmam que a expansão higrotérmica não ocorre em condição de saturação a 100% ou 0%, ou seja, nos casos em que se encontra totalmente saturada ou totalmente seca. A justificativa para tal decorre de que não é possível alterar a pressão de vapor d'água nestas duas situações. Além disso, Ghabezloo (2010) afirma que a porosidade é diretamente proporcional ao coeficiente de dilatação térmica.

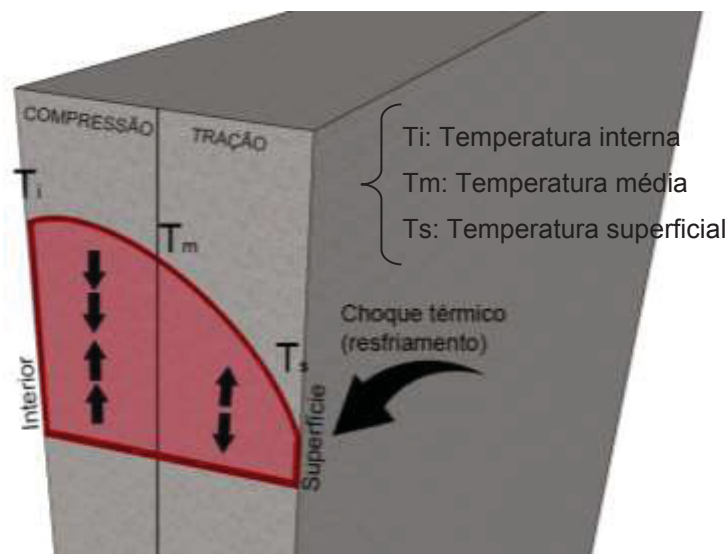
2.1.2.6 Tensão térmica

No caso do choque térmico, consequência de um resfriamento brusco, Kingery (1960) explica que a superfície do material atingirá rapidamente uma nova temperatura (T_s) mais baixa e, conseqüentemente, irá retrair. Contudo, este

fenômeno tenderá a ser impedido pela restrição interna do próprio revestimento, decorrente de seu interior – o qual se mantém na temperatura inicial (T_i), sem sofrer variação imediata pelo choque térmico superficial. Deste modo, cria-se um gradiente térmico que, associado à restrição de movimentação, ocasionará tensões de tração na superfície e compressão na parte interior.

Outrossim, quando a superfície de um material – com uma face exposta a um ambiente de menor temperatura (revestimentos, por exemplo) – são resfriados a uma taxa constante, a distribuição de temperatura é parabólica. Todavia, o grau de deformação deste material é dependente de uma temperatura média (T_m). Portanto, a tensão em qualquer ponto será função da diferença de temperatura entre esse dado ponto e a T_m , tal como ilustrado na FIGURA 4.

FIGURA 4 – PERFIL DE TEMPERATURA AO LONGO DO REVESTIMENTO, DURANTE O RESFRIAMENTO BRUSCO.



FONTE: Adaptado de Esquivel (2009).

Em posse do perfil de temperaturas ao longo da profundidade do revestimento, é possível calcular as tensões térmicas resultantes. Para tal, considera-se um material prismático, homogêneo e isotrópico em um sistema bidimensional com total restrição à deformação do prisma. Com tais simplificações, Timoshenko e Goodier (1968) afirmam que a tensão térmica de tração (τ) resultante na superfície de um material é diretamente proporcional ao gradiente térmico e ao seu módulo de elasticidade e coeficiente de dilatação térmica linear (EQUAÇÃO 2).

Assim, caso esta tensão solicitante ultrapasse a tensão crítica de ruptura (τ_c), em outras palavras: se $\tau \geq \tau_c$, ocorre fissuração o material.

$$\tau = \frac{E \cdot \alpha \cdot (T_s - T_i)}{(1 - \nu)} \quad \text{EQUAÇÃO 2}$$

Onde:

τ : tensão térmica estimada de tração normal (MPa);

E: módulo de elasticidade (MPa);

α : coeficiente de dilatação linear;

T_s : temperatura superficial externa;

T_i : temperatura interna;

ν : coeficiente de Poisson.

Sabe-se ainda que a variação dimensional diferencial entre o hidróxido de cálcio (CH) e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) gera tensões no interior da pasta de cimento no estado endurecido, quando da ocorrência de gradientes térmicos (SCHULSON; SWAINSON; HOLDEN, 2001).

2.2 ENSAIOS ACELERADOS DE CHOQUE TÉRMICO

Extrapolando os conceitos teóricos, existem procedimentos experimentais que permitem avaliar o desempenho de materiais a um limite intensivo de solicitações determinadas, os denominados ensaios acelerados. Os ensaios de envelhecimento acelerado consistem em expor o material a uma condição de degradação severa, de modo a acelerar a deterioração em um intervalo de tempo pequeno. Assim, é possível simular uma solicitação de deterioração real em um curto intervalo de tempo, similar a uma condição de deterioração alcançada ao longo da vida útil do material. Para intensificar a condição de exposição extrema pode-se recorrer a alguns parâmetros correlacionados à solicitação, tais como: temperatura; concentração; frequência de exposição; entre outros.

Conforme Crowe & Feinberg (2001), os ensaios acelerados simulam a situação real através de uma aceleração dos mecanismos de falha em um período de teste razoável, de modo que permita avaliar o desempenho do material. Quando

os mecanismos de degradação são altamente complexos (caso das solicitações em revestimentos verticais externos e seus subsistemas), a aplicação de modelos de aceleração empírica é mais adequada, vez que faz uso de dados disponíveis para avaliar a deterioração resultante (ESCOBA; MEEKER, 2006). A relevância de cada mecanismo de degradação depende do clima, bem como dos materiais de construção e do comportamento correspondente às condições climáticas. Em geral, é difícil simular todos os mecanismos de degradação e a maneira como eles interagem juntos. De fato, uma grande quantidade de pesquisas avalia o efeito da temperatura e da umidade no envelhecimento a longo prazo dos materiais de construção, uma vez que são parâmetros relevantes na degradação das argamassas (SILVA, 2004; FERRÁNDIZ-MAS; GARCÍA-ALCOCEL, 2013; HANNAWI; PRINCE-AGBODJAN, 2015; MAIA *et al.*, 2019).

Neste contexto, o ensaio de ação de calor e choque térmico configura um ensaio acelerado, o qual é empregado para fins de avaliação do desempenho de durabilidade do SVVE pela NBR 15575-4 (ABNT, 2013). Existem outras normas que especificam ensaios de choque térmico como ensaio de envelhecimento acelerado, tais como: ETAG 004 (2013); ISO 8.336 (2009); ASTM C1185-8 (2012).

No caso do choque térmico, o agente deteriorante é a variação brusca de temperatura, a qual induz um gradiente de temperatura, tornando-se provável a ocorrência de deformação diferencial. No caso da argamassa de revestimento, esta situação é representada por uma situação de chuva intensa sobre uma fachada previamente aquecida pela radiação solar. Conforme ressaltado por Kazmierczak *et al.* (2016), a deterioração decorrente da ação de ciclos térmicos está associada aos seguintes aspectos: coeficiente de expansão (ou dilatação) térmica (CET) dos materiais constituintes da argamassa; condutividade térmica; e gradiente de temperatura.

Na esfera nacional, a atenção relacionada ao estudo de ensaios acelerados decorrentes do choque térmico é notável, e remete a trabalhos desde a década de 90 até os tempos atuais, tal como elencado na TABELA 1. Observa-se que, de modo geral, há discrepância entre os parâmetros empregados nos diversos estudos. Contudo, é possível constatar maior tendência de alguns, como é o caso da temperatura de 80°C, para fins de aquecimento, e o número de ciclos, mais frequentemente utilizado como 10 (dez). Quanto a este aspecto, é válido comentar que, a partir de 2013, a grande maioria das pesquisas empregam a referida

temperatura e a quantidade de dez ciclos em seus procedimentos, provavelmente devido ao advento da norma de desempenho.

Por outro lado, quanto às dimensões das amostras, os valores adotados nos estudos variam entre si, desde 29 x 19 cm² até 240 x 240 cm² de área exposta. Todavia, quanto aos estudos posteriores à publicação da NBR 15575-4 (ABNT, 2013b), observa-se que a utilização de dimensões de largura de 100 até 140 cm (intervalo de valores adotado pela norma) se torna maioria.

TABELA 1 – RESUMO DE ESTUDOS RELACIONADOS AO CHOQUE TÉRMICO E PARÂMETROS ADOTADOS

Documento (ano)	Parâmetros			
	Sistema ensaiado	Dimensões da amostra (cm)	Temperatura máxima (duração)	Número de ciclos
GEYER (1994)	Bloco cerâmico + chapisco + cerâmica	75x50xE 45x60xE	80°C (1 h)	10
ROMAN <i>et al.</i> (2000)	Bloco cerâmico	91x91xE	68°C (1 h)	120
MIRANDA E SELMO (2003)	Bloco de concreto + chapisco + revestimento de argamassa	135x210xE	80°C (1 h)	10
CRESCÊNCIO E BARROS (2003)	Bloco cerâmico + revestimento monocamada	Não especificado	80°C (1 h)	10
VILATÓ E FRANCO (2005)	Bloco cerâmico estrutural + revestimento de argamassa	240x240xE	80°C (1 h)	12
ISO 8.336 (2009)	Chapas cimentícias planas (SVVE completo)	≥ 3,5 m ²	60°C (2 h 55 min)	25
ESQUIVEL (2009)	Bloco de concreto + revestimento de argamassa	40x30xE	70°C (3 h)	30
TEMOCHE E BARROS (2010)	Bloco de concreto + revestimento de argamassa	40x30xE	70°C (1,5 h)	30
FONTENELLE (2012)	Placas cimentícias	120x240xE	80°C (1 h)	10
ASTM C1185-8 (2012)	Chapas cimentícias planas (SVVE completo)	≥ 3,5 m ²	60°C (2 h 55 min)	25
ETAG 004 (2013)	Sistema de vedação leve (ETIC)	250x200xE	70°C	80
ABNT NBR 15575-4 (2013)	SVVE completo	120xPDxE	80°C	10
LORENZI (2013)	Parede de concreto armado	100x240xE	80°C (1 h)	10
OLIVEIRA <i>et al.</i> (2014)	Perfis de aço + Placas cimentícias	240x260xE 120x260xE	80°C (1 h)	10
VARISCO (2014)	Bloco de concreto + revestimento de argamassa	180x275x10	80°C (1 h)	10

Documento (ano)	Parâmetros			
	Sistema ensaiado	Dimensões da amostra (cm)	Temperatura máxima (duração)	Número de ciclos
CONTE (2014)	Bloco de concreto + pintura acrílica	120x230xE	80°C (1 h)	10
SENTENA (2015)	Bloco cerâmico + chapisco + revestimento de argamassa	29x19xE	80°C (1 h)	40
MORAES (2015)	Parede PVC + concreto	120x240x70	80°C (1 h)	10
FONTENELLE <i>et al.</i> (2017)	SVVE completo	240x240xE	80°C (1 h) 70°C (1 h) 65°C (1 h)	10
FERNANDES (2017)	Bloco de cerâmico + chapisco + revestimento de argamassa	120x240xE 60x40xE 30x40xE	80°C (1 h)	10 e 30
ESQUIVEL E BARROS (2018)	Base de concreto + Revestimento de argamassa	30x40x10	70°C (1,5 h)	30
FERREIRA <i>et al.</i> (2019)	SVVE completo	120x260xE 240x260xE	80°C (1 h)	10
KAZMIERCZAK <i>et al.</i> (2020)	Bloco de cerâmico + revestimento de argamassa	40x45xE	80°C (1 h)	10

E: espessura

PD: Pé-direito de obra

FONTE: Adaptado de Fernandes (2017).

Analizando-se a TABELA 1, observa-se que os estudos remetem aos sistemas de vedação como um todo, de modo a avaliar diferentes elementos que o compõem. Tal avaliação, embora holística, demanda as dimensões elevadas retratadas anteriormente, o que resulta em maiores custos e resíduos.

Deste modo, é possível pontuar que um procedimento de ensaio voltado à avaliação do revestimento de argamassa, apenas um elemento que compõem o SVVE, pode viabilizar a redução das dimensões aplicadas, trazendo benefícios econômicos e ambientais. Todavia, reconhece-se que tal fato é, ao mesmo tempo, uma limitação, restringindo a avaliação para apenas um elemento, impedindo-se de traçar avaliações a respeito do SVVE completo.

2.3 NORMA DE DESEMPENHO (NBR 15575)

Ainda ao que tange à avaliação de durabilidade de elementos de uma edificação, comenta-se acerca da NBR 15575 (ABNT, 2013a). Este documento prescreve requisitos de desempenho de edificações habitacionais. A referida norma

encontra-se dividida em seis partes, sendo que a primeira remete aos conceitos e requisitos gerais. As demais, por sua vez, dizem respeito a sistemas específicos de uma edificação, com os respectivos requisitos e critérios a serem atendidos.

Segundo a parte 1, é necessário que a edificação apresente durabilidade compatível com a vida útil de projeto (VUP). Para tal, prescreve requisitos de durabilidade e manutenibilidade para paredes externas e os critérios para avaliação:

“Devem ser limitados os deslocamentos, fissurações e falhas nas paredes externas, incluindo seus revestimentos, em função de ciclos de exposição ao calor e resfriamento que ocorrem durante a vida útil do edifício [...]. As paredes externas, incluindo seus revestimentos, submetidas a dez ciclos sucessivos de exposição ao calor e resfriamento por meio de jato de água, não devem apresentar: - deslocamento horizontal instantâneo, no plano perpendicular ao corpo-de-prova, superior a $h / 300$, onde h é a altura do corpo de prova; - ocorrência de falhas como fissuras, destacamentos, empolamentos, descoloramentos e outros danos que possam comprometer a utilização do SVVE.” (ABNT, 2013b).

Conforme define a norma NBR 15575-1 (ABNT, 2013a), durabilidade é a capacidade da edificação ou de seus sistemas de desempenhar as suas funções, ao decorrer do tempo e sob condições de uso e manutenção. A mesma apresenta os requisitos de desempenho quanto à durabilidade para diferentes sistemas de uma edificação.

2.3.1 Parte 4 (SVVIE) – ação de calor e choque térmico

Em sua Parte 4, a referida norma trata dos sistemas de vedações verticais internas e externas (SVVIE), que contemplam os revestimentos argamassados – foco do presente estudo. Destarte, a referida norma indica, em seu Anexo E, um procedimento de ensaio para a avaliação do desempenho quanto à durabilidade. Esse possui por princípio a verificação do comportamento de sistemas de vedação vertical externo (SVVE), submetidos a ciclos sucessivos de calor proveniente de fonte radiante e resfriamento por jatos de água.

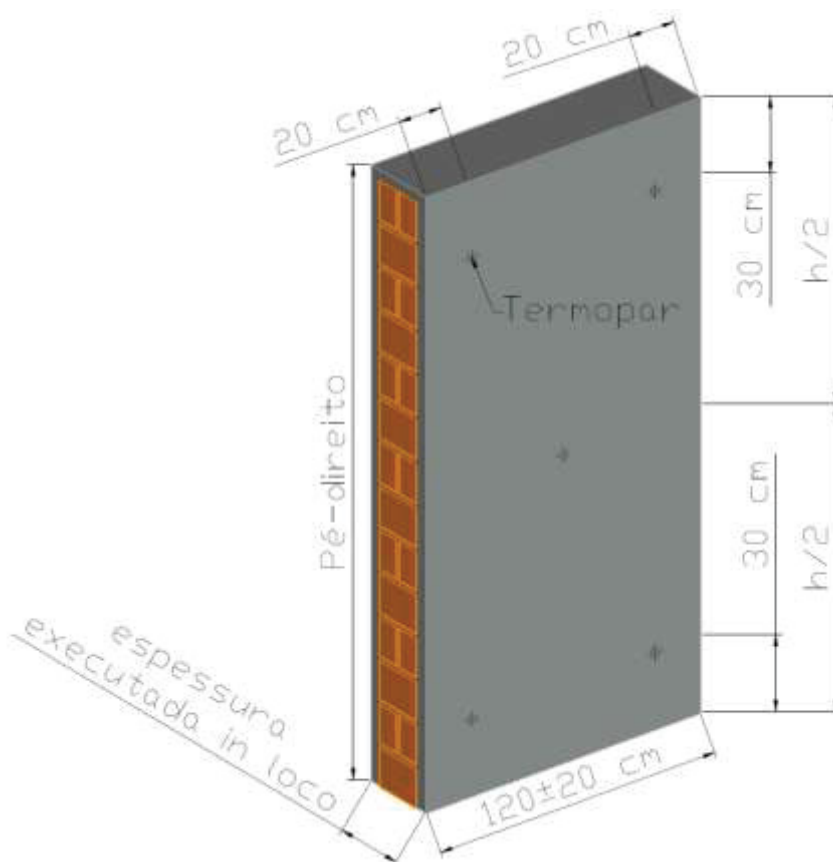
O procedimento consiste em aplicar dez ciclos sucessivos de aquecimento (até 80 ± 3 °C) e resfriamento brusco por aspersão de água (até 20 ± 3 °C) sobre um painel de parede com o sistema de vedação vertical completo, reproduzindo as dimensões de espessura e pé-direito executadas em obra. O ciclo consiste basicamente em:

- ação do calor: aquecer o corpo de prova, por meio de painel radiante, até atingir a temperatura determinada (a amostra deve ser mantida nesta por mais 1 (uma) hora, após atingir a temperatura especificada);
- ação da água: imediatamente após completar o ciclo de aquecimento, resfriar, por meio de aspersão d'água, a face exterior do corpo de prova, até atingir a temperatura especificada.

Para tal, a configuração do ensaio requer (vide ilustrado em FIGURA 5), resumidamente:

- 2 (dois) Corpos de prova por sistema, constituído por um trecho de parede acabada (executada com os detalhes construtivo a serem empregados em obra), com dimensões:
 - Pé direito: equivalente ao executado em obra;
 - Espessura: equivalente ao executado em obra;
 - Extensão: $(1,20 \pm 0,20)$ m;
- painel radiante capaz de fornecer quantidade de calor de modo que a face externa da parede atinja $(80 \pm 3)^{\circ}\text{C}$;
- dispositivo de aspersão de água sobre o corpo de prova, capaz de resfriar o corpo de prova até $(20 \pm 3)^{\circ}\text{C}$;
- 5 (cinco) termopares e registrador de temperaturas superficiais da parede;
- 1 (um) defletômetro de haste, com resolução de 0,02 mm;
- dispositivo para fixação do corpo de prova, deixando-o simplesmente aparado em seus bordos inferior e superior.

FIGURA 5 – ESQUEMA DE MONTAGEM E INSTRUMENTAÇÃO DO CORPO DE PROVA DO “ANEXO E” DA NBR 15575-4.



FONTE: Adaptado de ABNT (2013).

Ademais, a norma prescreve que sejam registrados ao longo do ensaio:

- ocorrência de fissuras, trincas, descolamentos ou outras deteriorações em ambas as faces do corpo de prova;
- deslocamento horizontal após 45 min da estabilização da temperatura superficial em $(80 \pm 3) ^\circ\text{C}$, e imediatamente após o resfriamento – comparando com o valor limite $(h/300)$.

Ao fim do ensaio, registram-se a ocorrência de degradações ao longo do ensaio (indicando o instante de ocorrência e o tipo) e deslocamentos horizontais em milímetros, em cada ciclo, durante a ação do calor e após o resfriamento.

Nota-se que – embora busque produzir fidelidade ao que de fato é executado em obra (em termos de dimensões e acabamentos) – o ensaio exige uma certa complexidade de equipamentos para sua execução, tornando seu custo elevado. Além disso, a execução dos corpos de prova, em si, também demanda

uma alta quantidade de material. Com efeito, é possível estimar – considerando: um pé direito de 2,40 m (usual em obras); espessura total de 20 cm (estimativa de alvenaria + revestimento); e extensão de 1,20 m (padrão do ensaio) – um volume de aproximadamente 0,60 m³ por corpo de prova. Portanto, se o ensaio demanda 2 corpos de prova por sistemas, atinge-se o valor aproximado de 1,20 m³ de material bruto por ensaio – estimando-se cerca de 2,40 m³ de resíduo de demolição, aplicando o coeficiente equivalente a 2,0, vide sugerido por Mattos (2006), para conversão de volume de paredes de alvenaria construídas em volume de demolição. Infere-se, por conseguinte, que é possível traçar críticas ao ensaio do ponto de vista econômico e ambiental.

2.3.2 Normas internacionais – contexto

Em uma breve comparação entre o ensaio de calor e choque térmico nacional, regido pela norma de desempenho, e outros internacionais (ETAG 004, 2013; ISO 8.336, 2009; ASTM C1185-8, 2012), notam-se algumas discrepâncias – tal como observado por Oliveira *et al.* (2014). Apresenta-se na TABELA 2 um breve comparativo entre as referidas normas e suas respectivas divergências. Dentre tais variações, destacam-se as diferentes temperaturas aplicadas e, para o caso da norma americana, o uso de aferição indireta de temperatura da amostra. Esse método indireto consiste em ler a temperatura de uma placa metálica de cor preta, fixada sobre o corpo de prova, visando padronizar a energia de aquecimento. Dessa forma – independentemente do comportamento do material ensaiado frente ao aquecimento – considera-se a aferição de temperatura para o mesmo material (placa metálica preta).

TABELA 2 – COMPARATIVO ENTRE ENSAIOS DE CHOQUE TÉRMICO DA NBR 15575 E NORMAS INTERNACIONAIS.

Categoria	Parâmetro	Norma		
		NBR 15575-4 (ABNT, 2013b)	ISO 8.336 (2009); ASTM C1185-8 (2012)	ETAG 004 (2013)
Aquecimento	Aferição de temperatura	Termopares (diretamente)	Termopares (indiretamente)	Termopares (diretamente)
	Tempo para atingir a temperatura	Não especificado	Não especificado	1 h
	Temperatura máxima	(80±3)°C	(60±5)°C	(70±5)°C
	Permanência em temperatura máxima	1 h	2 h 55 min	2 h
	Variação tolerada entre centro e bordas	±3°C	Não especificado	Não especificado
Resfriamento	Temperatura da água	Não especificado	30°C	(15±5)°C
	Quantidade de água	Não especificado	3,79 L/min	≈ 6 L/min
	Distribuição sobre a superfície	Aspersão uniforme	Aspersão uniforme	Aspersão uniforme
	Tempo de resfriamento	Variável; até atingir (20±3)°C	2 h 55 min	2 h
	Temperatura da amostra após resfriamento	(20±3)°C	Não especificado	Não especificado
Ciclos	Tempo de cada ciclo	Variável	6 h	6 h
	Quantidade de ciclos	10	25	80
	Intervalo entre ciclos	Não especificado	5 min	2 h
Amostras	Dimensões	≥ 3,0 m ² (1,2x2,5)	≥ 3,5 m ²	≥ 6,0 m ²
	Restrições de movimento de borda	Sem restrição	Com restrição	Sem restrição

FONTE: Adaptado de OLIVEIRA *et al.* (2014).

Observa-se que a ASTM C1185-8 prescreve aferição de temperatura de forma indireta, visando padronizar a solicitação imposta sobre o SVVE, sem que esta sofra interferência do desempenho do elemento avaliado. Na mesma linha, a ETAG 004 especifica um tempo fixo para aquecimento (1h para atingir a temperatura, acrescido de mais 2h em temperatura máxima). As normas internacionais listadas na TABELA 2 diferem da NBR 15575-4 (ABNT, 2013) quanto à: temperatura (aquecimento e resfriamento); quantidade de água; tempo, quantidade e intervalo de ciclos; dimensão da amostra; e restrição de movimento de borda.

Reconhece-se que tais distinções podem ser remetidas às condições climáticas específicas de cada região (país) de vigência das referidas normas. Não

obstante, vale ressaltar que o Brasil possui diferentes regiões com distintos macroclimas, evidenciando uma possível limitação do procedimento contido no Anexo E da NBR 15575-4 (ABNT, 2013), vez que este é padrão para o país como um todo, sem considerar as particularidades de cada região climática do território nacional.

Lorenzi (2013) estudou alguns ensaios de desempenho de edificações estabelecidos pela NBR 15575 (ABNT, 2013), apresentando um mapeamento que permitisse apontar, de maneira crítica, alguns aprimoramentos ao procedimento de ensaio de ação de calor e choque térmico (Anexo E da 4ª parte da referida norma). Dentre tais sugestões, vale destacar: especificação técnica de painel radiante e sistema de aspersão de água; modificação do suporte de defletômetro; indicação de desenho esquemático para confinamento do corpo de prova; revisão do valor do parâmetro de aceitabilidade quanto ao deslocamento horizontal; inclusão do ensaio de estanqueidade à água da chuva como parâmetro de aceitabilidade. Outros autores, tais como Oliveira *et al.* (2014), também propuseram melhorias ao ensaio de durabilidade dos SVVE – dentre elas, vale destacar a adoção de uma vazão de aspersão de água de 3 L/min (parâmetro não especificado pelo procedimento normativo).

2.4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ARGAMASSAS

Adentrando ao mérito das argamassas de revestimento, Isaia (2010) elenca como funções destes elementos:

- proteger o substrato e estrutura interna de uma edificação contra intemperismos e ações externas;
- atuar como isolante térmico e acústico;
- promover estanqueidade à água;
- oferecer segurança contra incêndios, abrasão e demais abalos superficiais;
- favorecer a estética da edificação, regularizando as superfícies dos substratos e atuando como base para acabamentos decorativos.

Para que uma dada argamassa de revestimento possa desempenhar as funções elencadas anteriormente, esta deve apresentar, em seu estado fresco,

trabalhabilidade e adesividade adequadas à sua aplicação, além de uma baixa retração plástica. Em termos de estado endurecido, a argamassa deve possuir baixa permeabilidade e retração por secagem e valores de aderência (>30 MPa), resistência mecânica e capacidade de absorver deformação compatíveis ao sistema (SABBATINI, 1981; SELMO, 1989. SELMO, 2002).

2.4.1 Requisitos normativos

Tal como explanado anteriormente, a norma de desempenho define alguns requisitos a serem cumpridos dentro do mérito da durabilidade. Conquanto, existem outras normas nacionais que apresentam requisitos mínimos a serem cumpridos pelas argamassas de revestimentos.

Na esfera nacional, elencam-se três normas principais em termos de requisitos e especificações para argamassas de revestimento: NBR 16648 (ABNT, 2018); NBR 13281 (ABNT, 2005); e NBR 13749 (ABNT, 2013). Esta última norma fixa as condições exigíveis para o recebimento de revestimento de argamassas inorgânicas aplicadas sobre paredes e tetos de edificações. Dentre suas admissões, ressalta-se o intervalo tolerado para espessura do revestimento de parede externa: 2 a 3 cm.

A NBR 13281 (ABNT, 2005), por outro lado, trata dos requisitos exigíveis para argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos, aplicando-se a argamassas industrializadas, dosadas em central e preparadas em obra. Para tanto, a referida norma especifica intervalos de valores admissíveis para algumas propriedades das argamassas de revestimento, classificando e separando as argamassas de assentamento e revestimento de acordo com seu desempenho. Primeiramente, no que tange à avaliação mecânica, a referida norma estabelece diferentes categorias de acordo com a resistência à compressão, resistência à tração na flexão, densidade de massa aparente no estado endurecido e coeficiente de capilaridade. Ademais, a caracterização no estado fresco é dada pelo ensaio de retenção de água, conforme a NBR 13277 (ABNT, 2005), e densidade de massa, de acordo com a NBR 13278 (ABNT, 2005). Tais requisitos são apresentados na TABELA 3.

TABELA 3 – REQUISITOS DA NBR 13281 (ABNT, 2005)

Estado	Propriedade	Classes	Intervalo	Método de ensaio
Endurecido	Resistência à compressão	P1 a P6	2 a 8 MPa	NBR 13.279
	Densidade de massa aparente no estado endurecido	M1 a M6	1.200 a 1.800 kg/m ³	NBR 13280
	Resistência à tração na flexão	R1 a R6	1,5 a 3,5 MPa	NBR 13.279
	Coefficiente de capilaridade	C1 a C6	1,5 a 10 g/dm ² .min ^{1/2}	NBR 15259
Fresco	Densidade de massa no estado fresco	D1 a D6	1.400 a 2.00 kg/m ³	NBR 13278
	Retenção de água	U1 a U6	78 a 100%	NBR 13277

FONTE: Adaptado de ABNT (2005).

De modo geral, as argamassas, como um todo, estão sujeitas às restrições térmicas e hídricas que contribuem fortemente para seu envelhecimento. De tal forma, quando ocorre a evaporação da água da mistura ou a mesma é absorvida pelo substrato de maneira rápida, a hidratação do cimento é prejudicada, de modo que ocorra uma redução da resistência mecânica do material. Sendo assim, a capacidade do material em reter água é de importância fundamental. Tal propriedade pode ser controlada por meio da composição do mesmo. A presença de materiais finos, por exemplo, pode contribuir para aumentar a retenção de água da mistura (SÉBAÏBI *et al.*, 2003). Além disso, a retenção de água pode ser avaliada pelo método prescrito na NBR 13277 (ABNT, 2005).

Mais recentemente, a NBR 16648 (ABNT, 2018) especifica os requisitos, critérios e métodos de ensaio para caracterização e avaliação do desempenho, em laboratório, de argamassas técnicas decorativas. Para tanto, a referida norma apresenta, inicialmente, alguns conceitos. Destarte, a argamassa técnica decorativa (ATD) é definida como a argamassa obtida da mistura de um ou mais aglomerantes inorgânicos, agregados e água, podendo ou não conter pigmentos e/ou aditivos e/ou adições, adequada à utilização como última camada (aparente) do revestimento de edificações. Ademais, a norma divide os requisitos e critérios para avaliação e aceitação da ATD entre estado fresco e estado endurecido, tal qual apresentado nas TABELA 4 e TABELA 5, respectivamente. Esta norma destaca ainda que, no âmbito do revestimento de argamassa vertical completo (chapisco, emboço e reboco ou monocamada) deve-se seguir a NBR 13281 (ABNT, 2005).

TABELA 4 – REQUISITOS DA NBR 16648 (ABNT, 2018) NO ESTADO FRESCO

Propriedade	Classificação	Intervalo	Método de ensaio
Retenção de água	Baixa	70 a 80	NBR 13277
	Média	80 a 90	
	Alta	> 90	
Densidade de massa e teor de ar incorporado	NBR 13281	1,5 a 10 g/dm ³ .min ^{1/2}	NBR 13278
Tempo de uso	Fabricante	-	-

FONTE: Adaptado de ABNT (2018).

TABELA 5 – REQUISITOS DA NBR 16648 (ABNT, 2018) NO ESTADO ENDURECIDO

Propriedade	Critério	Método de ensaio
Resistência à tração na flexão	$\geq 2,0$ MPa	NBR 13.279
Módulo de elasticidade dinâmico	≤ 12 GPa	NBR 15630
Variação dimensional (retração)	$\leq 1,2$ mm/m	NBR 15261
Resistência potencial de aderência à tração	Variável	NBR 15258
Absorção de água por capilaridade (C _{24h})	Região norte e zona costeira $\leq 0,2$ kg/m ² .h ^{1/2}	EN ISO 15.148
	Demais regiões $\leq 0,4$ kg/m ² .h ^{1/2}	
Fator de resistência à difusão do vapor	Região norte e zona costeira ≤ 20	EN ISO 12.572
	Demais regiões ≤ 35	
Permeabilidade à água sob pressão	$\leq 1,0$ mL/cm ² (48 h)	NBR 16648 (Anexo C)

FONTE: Adaptado de ABNT (2018).

2.4.2 Suscetibilidade à fissuração

Por outro lado, a NBR 16648 (ABNT, 2018) especifica critérios para a avaliação da suscetibilidade à fissuração, baseando-se nos valores de variação dimensional (retração), de módulo de elasticidade dinâmico e da relação “módulo de elasticidade dinâmico/resistência à tração na flexão”, tal como apresentado na TABELA 6.

TABELA 6 – CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO QUANTO À SUSCETIBILIDADE À FISSURAÇÃO

Propriedade	Classificação da suscetibilidade à fissuração		
	Fraca	Média	Forte
Variação dimensional (mm/m)	$\leq 0,7$	0,7 a 1,2	$> 1,2$
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	$\leq 7,0$	7,0 a 12,0	> 12
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa) / Resistência à tração na flexão (MPa)	$\leq 2,5$	2,5 a 3,5	$> 3,5$

FONTE: Adaptado de ABNT (2018).

Infere-se que a retração por secagem, o módulo de elasticidade e a resistência mecânica do revestimento estão diretamente relacionados com a sua suscetibilidade à fissuração.

2.4.2.1 Retração por secagem

Segundo a NBR 16648 (ABNT, 2018), é a retração por secagem (avaliada por meio da variação dimensional de barras de argamassa, em laboratório), que se configura como um requisito de desempenho para fins de avaliação da durabilidade. Ressalta-se, no entanto, que a retração plástica – não mencionada na referida norma – não contempla o escopo do presente estudo, pois o mesmo busca avaliar as propriedades no estado endurecido das argamassas de revestimento.

Assim, a retração por secagem ocorre da mesma maneira que a retração plástica, no entanto, com o compósito em seu estado endurecido. Assim, a retração por secagem representa a deformação do material gerada pela troca de água com o ambiente externo. A ocorrência da retração por secagem resulta da evaporação da água que compõe a estrutura cimentícia, de modo a gerar tensões capilares, implicando em perda de volume e a consequente fissuração. Esse efeito se torna ainda mais explícito em placas com grandes áreas expostas, tais como os revestimentos de contrapiso e fachadas. A presença de adições minerais com taxas de substituição adequadas proporciona o aumento da resistência à compressão, além de uma redução da retração por secagem – consequência da sua contribuição para a produção de outros hidratos e para a melhoria da qualidade da microestrutura (ITIM *et al.*, 2011).

2.4.2.2 Deformabilidade e propagação de onda ultrassônica

O módulo de elasticidade pode ser definido como uma relação entre uma dada tensão e a deformação resultante de um elemento em estágio de deformação elástica. Contudo, devido ao fato de as argamassas comportarem-se elasticamente somente em baixas tensões, o mecanismo de deformação destas, para tensões mais elevadas, envolve a ocorrência de microfissuras, tal que o termo “módulo de deformação” é considerado mais coerente do que “módulo de elasticidade” (SABBATINI *et al.*, 1989).

Portanto, o módulo de deformação é um parâmetro de rigidez do material, tal que diversos trabalhos reconhecem sua influência sobre as tensões térmicas, de modo que quanto maior o módulo, maior a tensão apresentada pelo elemento (HASSELMAN, 1963; VECCHIO E SATO, 1990; FIORITTO, 1994; ESQUIVEL, 2009; MOSCOSO *et al.*, 2013). Fiorito (1994) pontua ainda que traços de argamassas ricas tendem a possuir módulos de deformação mais altos, em comparação com traços pobres.

Cabe destacar que o termo “módulo de elasticidade dinâmico” é o valor do módulo de elasticidade determinado por meio de procedimento de ensaio não destrutivo, através de pulso de ondas ultrassônicas. O procedimento deste ensaio e o referido termo são descritos na NBR 15630 (ABNT, 2009), que consiste em medir a velocidade de propagação de onda ultrassônica através do corpo de prova. Com esse dado, é possível calcular – por meio da EQUAÇÃO 3 – o valor do módulo de elasticidade dinâmico.

$$E_d = \mu^2 \cdot \rho \frac{(1 + \nu) + (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad \text{EQUAÇÃO 3}$$

Onde:

E_d : módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

μ : velocidade de propagação da onda ultrassônica (mm/ μ s);

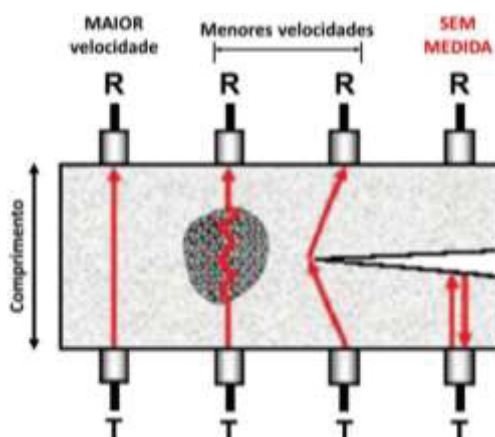
ρ : densidade de massa aparente do corpo de prova (kg/m³);

ν : coeficiente de Poisson.

Conforme a EQUAÇÃO 3, nota-se que um dos dados de entrada é o coeficiente de Poisson (ν), que pode ser descrita como uma propriedade elástica dos materiais, definida pela relação entre a deformação longitudinal e a deformação transversal (CALLISTER, 2000). A norma NBR 15630 (ABNT, 2009) sugere a adoção do valor teórico de 0,2 como o padrão para argamassas.

O princípio da avaliação do desempenho pelo ensaio de “módulo de elasticidade dinâmico”, prescrito pela NBR 15630 (ABNT, 2008), pauta-se nas modificações que a velocidade de pulso ultrassônico sofre ao entrar em contato com algum “obstáculo” (heterogeneidade) do material, caracterizando, de maneira indireta, a densidade e integridade das amostras. Essa heterogeneidade pode estar associada a fissuras internas ou deterioração da argamassa, conforme ilustrado na FIGURA 6 (CHIES, 2014; CAMARA *et al.*, 2018).

FIGURA 6 – ILUSTRAÇÃO DO PRINCÍPIO DO ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA EM QUATRO CASOS DISTINTOS



Fonte: CHIES (2014).

2.4.2.3 Resistividade elétrica superficial

Extrapolando a avaliação prescrita na NBR 16648 (ABNT, 2018), é possível avaliar a ocorrência de fissuras em materiais cimentícios através de outros métodos. A resistividade elétrica superficial (RES), por exemplo, é uma medida indireta da quantidade e conectividade de poros do material, sendo um importante parâmetro para medida das propriedades de transporte de massa e do grau de degradação de compostos cimentícios. Por meio da resistividade elétrica é possível verificar a capacidade do material em transportar corrente elétrica no seu interior, sendo esse

um parâmetro contrário à condutividade. A diferença de potencial ou corrente aplicada por eletrodos é transportada pelos íons através da rede de poros do material preenchidos com solução (WANG *et al.*, 2013; MEDEIROS-JUNIOR, 2014). Deste modo, a RES está relacionada à permeabilidade, podendo – por conseguinte – ser relacionada como um parâmetro indireto de avaliação da durabilidade (ANDRADE, 2004).

Ressalva-se, contudo, que este ensaio é usualmente aplicado para avaliação de durabilidade de concretos, como indicativo de potencial de corrosão, para os quais existem parâmetros sugeridos na literatura (BALESTRA *et al.*, 2019). Portanto, estes parâmetros não serão considerados no presente estudo, vez que o escopo corresponde a argamassas de revestimento.

Portanto, tendo em vista que a relação a/c (ou a/ms no caso de argamassas) afeta a estrutura porosa da pasta de cimento, especificamente no que tange ao volume total de poros e à quantidade de poros de diâmetros maiores, ela pode apresentar correlação com a RES. De modo geral, então, quanto menor é a relação a/ms , menor será o volume de poros e a probabilidade de existirem poros com maiores diâmetros e interconectados, levando a uma maior resistividade elétrica (SANTOS, 2006; MENDES *et al.*, 2018).

Outro fator relevante para esta propriedade é a idade, tal que quão maior é a idade, maior tende a ser a resistividade elétrica superficial, em condições que não ocorra degradação do material avaliado (HOSSAIN *et al.*, 2009; NAYAKA *et al.*, 2018).

3 ESTRUTURA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

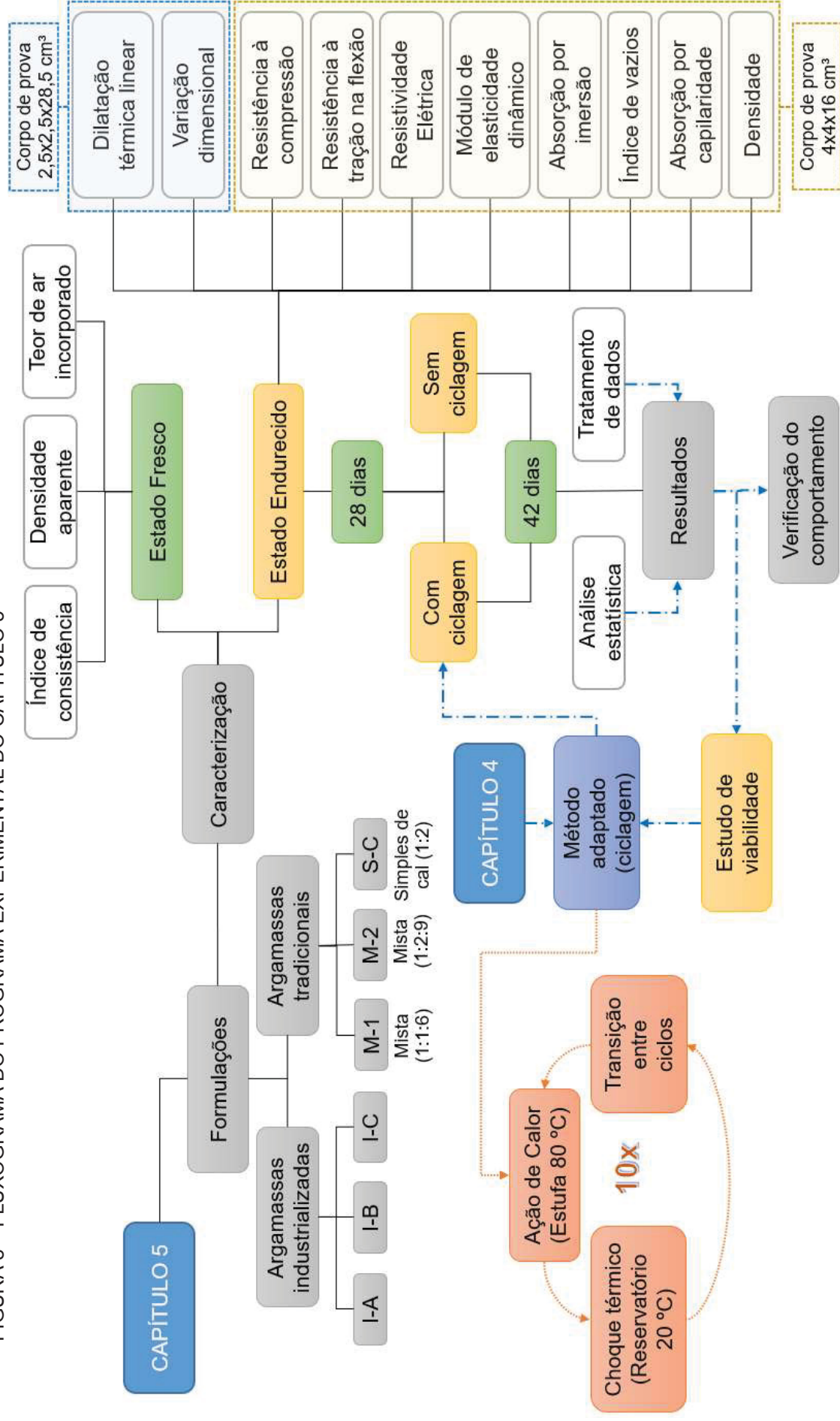
Este capítulo apresenta a estrutura adotada do programa experimental, tendo em vista o objetivo de propor um método de verificação do comportamento de argamassas de revestimento externo expostas à ação de calor e choque térmico, baseado no procedimento contido no Anexo E da norma de desempenho (NBR 15575-4) e, então, avaliar o efeito dessa exposição no desempenho das argamassas e sua respectiva sensibilidade. Para tal, o programa experimental encontra-se dividido em dois itens principais:

- **CAPÍTULO 4:** DEFINIÇÃO DO MÉTODO ADAPTADO DE AÇÃO DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO;
- **CAPÍTULO 5:** APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO.

Primeiramente, dentro de cada capítulo, são apresentadas as variáveis da pesquisa e as formulações de argamassas de revestimento estudadas. Na sequência, os materiais, utilizados como insumos para compor as formulações, com as respectivas caracterizações. Posteriormente, os métodos empregados, abordando procedimentos de caracterização das formulações, definição da proposta do método adaptado e sua validação, demais ensaios e análise estatística. Finalmente, são apresentados, nos itens respectivos, os resultados, discussões e conclusões decorrentes.

Com intuito de facilitar e ilustrar o conteúdo de cada etapa de estudo, apresentam-se os fluxogramas do Capítulo 4 e Capítulo 5 na FIGURA 7 e na FIGURA 8, respectivamente.

FIGURA 8 – FLUXOGRAMA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL DO CAPÍTULO 5



FONTE: O autor (2020).

4 DEFINIÇÃO DO MÉTODO ADAPTADO DE AÇÃO DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO

4.1 VARIÁVEIS DA PESQUISA

As variáveis de estudo podem ser divididas em: independentes e parâmetros fixos, as quais não apresentam perturbações por qualquer outro fator; e as variáveis de resposta (dependentes), que apresentam variação em função das demais, tal qual apresentado, respectivamente, na TABELA 7 e na TABELA 8.

TABELA 7 – VARIÁVEIS INDEPENDENTES E PARÂMETROS FIXOS DA PESQUISA

Tipo	Parâmetros	
Variáveis independentes	Tipos de aglomerante	Cimento Portland CP II-F-32 Cal Hidratada CH-III
	Traços em volume	1:2 (cal:areia) 1:1:6 (cimento:cal:areia) 1:2:9 (cimento:cal:areia)
	Argamassas industrializadas	I-A I-B I-C
Parâmetros fixos	Tipo de Agregado	Areia (agregado mineral)
	Procedimento de mistura	NBR 16541 (ABNT, 2016)
	Procedimento de cura	Ambiente de laboratório
	Temperatura de aquecimento	80 ± 3°C
	Temperatura de resfriamento	20 ± 3°C

FONTE: O autor (2020).

TABELA 8 – VARIÁVEIS DEPENDENTES DA PESQUISA

Variáveis dependentes
Tipos de resfriamento
Tempo de etapas da ciclagem
Temperatura superficial externa
Temperatura interna

FONTE: O autor (2020).

4.2 FORMULAÇÕES

Para o desenvolvimento do programa experimental, foram definidas e produzidas em laboratório as argamassas de revestimento a serem estudadas, totalizando 6 (seis) formulações distintas. Para tal, foram fixas 3 (três) formulações de argamassas industrializadas (múltiplo uso, tipo massa pronta), denominadas I-A, I-B e I-C, e mais 3 (três) formulações desenvolvidas em laboratório (denominadas tradicionais), sendo uma argamassa simples de cal, com traço 1:2 (cal:areia; em volume), e duas argamassas mistas (cimento e cal), com traço 1:1:6 (cimento:cal:areia; em volume) e 1:2:9 (cimento:cal:areia; em volume), comuns em obra. A utilização de diferentes traços é justificada pelo fato de permitir avaliar argamassas com comportamentos e desempenho distintos frente à ação de calor e choque térmico.

Aplicou-se o procedimento de mistura em argamassadeira planetária, conforme prescrito pela NBR 16541 (ABNT, 2016). A consistência das formulações de argamassas tradicionais (não aplicada para as industrializadas) foi fixada em 260 ± 10 mm, amplamente empregada por pesquisadores (SELMO; HELENE, 1991; GOMES; NEVES, 2002; FREITAS, 2010; ISAIA, 2010; SANTOS, 2011; SANTOS, 2014; SANTOS *et al.*, 2018), de modo que a relação a/ms foi ajustada de forma a atender a esta faixa de consistência. Para o caso das argamassas industrializadas, seguiu-se o valor de a/ms médio indicado pelo respectivo fabricante.

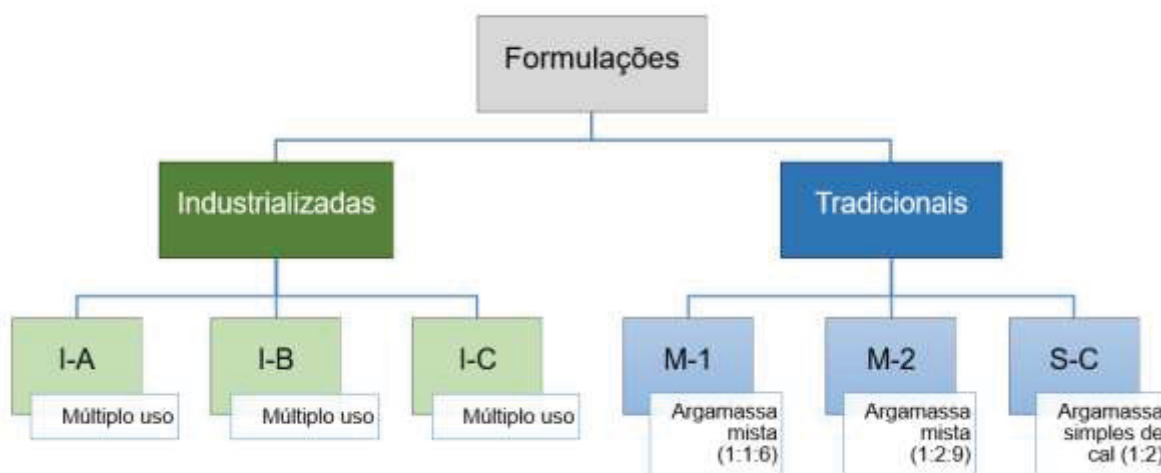
Dessa forma, estão elencadas na TABELA 9 as formulações empregadas neste estudo, com as respectivas informações. A FIGURA 9 contém um fluxograma ilustrativo, com intuito de facilitar a compreensão dos dois grupos: industrializadas e tradicionais.

Os procedimentos de moldagens dos corpos de prova seguiram as respectivas normas de ensaio para os quais as amostras foram destinadas. Ressalta-se, contudo, que os corpos de prova da formulação simples da cal (S-C) foram desmoldados com idade diferente das demais formulações, haja vista que – em virtude de serem compostos apenas de cal, areia e água – necessitaram de mais tempo para atingir endurecimento suficiente para realizar tal procedimento. As amostras S-C foram desmoldadas com 7 dias (168 horas) de idade (a contar da moldagem), enquanto as demais foram desmoldadas com 2 dias (48 horas) de

idade. Por fim, salienta-se que as idades dos corpos de prova serão doravante referenciadas a partir da data de moldagem dos mesmos.

O procedimento de cura dos corpos de prova foi realizado ao ar, em ambiente de laboratório, com temperatura controlada a $(23\pm3)^{\circ}\text{C}$.

FIGURA 9 – FORMULAÇÕES ESTUDADAS NO PROGRAMA EXPERIMENTAL.



FONTE: O autor (2020).

TABELA 9 – CONSUMO DE MATERIAIS (kg/m³) DAS ARGAMASSAS

Argamassa	Consumo (kg/m³)				a/ms	Índice de consistência (mm)
	Cimento Portland (CP II-F-32)	Cal Hidratada (CH-III)	Areia média natural	Água		
I-A	-	-	-	164,56	0,14*	203
I-B	-	-	-	206,90	0,16*	211
I-C	-	-	-	168,25	0,14*	225
M-1	283,70	137,72	1.928,06	440,53	0,19**	259
M-2	191,06	185,49	1.947,66	435,79	0,19**	259
S-C	-	381,75	1.781,51	486,73	0,22**	259

*Valor médio recomendado pelo fabricante.

**Valor definido conforme ajuste da formulação, atendendo à consistência especificada.

FONTE: O autor (2020).

4.3 MATERIAIS

4.3.1 Água de amassamento

A água utilizada foi proveniente da rede de distribuição da Sanepar, disponível para utilização no LAME. A sua massa unitária é 1,00 g/cm³.

4.3.2 Aglomerantes

Como aglomerantes a compor a mistura das formulações de argamassa de revestimento estudadas, empregaram-se dois tipos: cimento Portland e cal hidratada.

4.3.2.1 Cimento Portland

O cimento empregado para as formulações desenvolvidas foi o CP II-F-32. Sua escolha se dá devido ao fato de este não possuir adição de materiais que alterem a química da hidratação, apesar de possuir substituição parcial do aglomerante por fíler (adição inerte). Além disso, a substituição de fíler neste tipo de matriz de cimento reduz o impacto ambiental, pois este material resulta em menor emissão de CO₂ em comparação à produção do cimento.

As propriedades físicas, químicas e mecânicas do cimento CP II-F-32 estão apresentadas na TABELA 10, na TABELA 11 e na TABELA 12.

TABELA 10 – PROPRIEDADES FÍSICAS DO CIMENTO CP II-F-32

Expansibilidade a quente	Tempo de pega (h:min)		Consistência normal (%)	Blaine (cm ² /g)	Finura #200 (%)	Finura #325 (%)	Massa unitária (g/cm ³)
	Início	Fim					
0,36	231	277	27,50	3.401	0,81	6,25	1,24

FONTE: Fabricante (2019).

TABELA 11 – CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO CIMENTO CP II-F-32

Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Perda Fogo (%)	CaO Livre (%)	Resíduo Insolúvel (%)	Equivalente Alcalino (%)
4,31	18,53	2,98	61,75	1,82	2,70	6,50	0,90	1,49	0,69

FONTE: Fabricante (2019).

TABELA 12 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CIMENTO CP II-F-32

Propriedade	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
Resistência à compressão (Mpa)	16,1	30,6	36,1	42,9

FONTE: Fabricante (2019).

4.3.2.2 Cal Hidratada

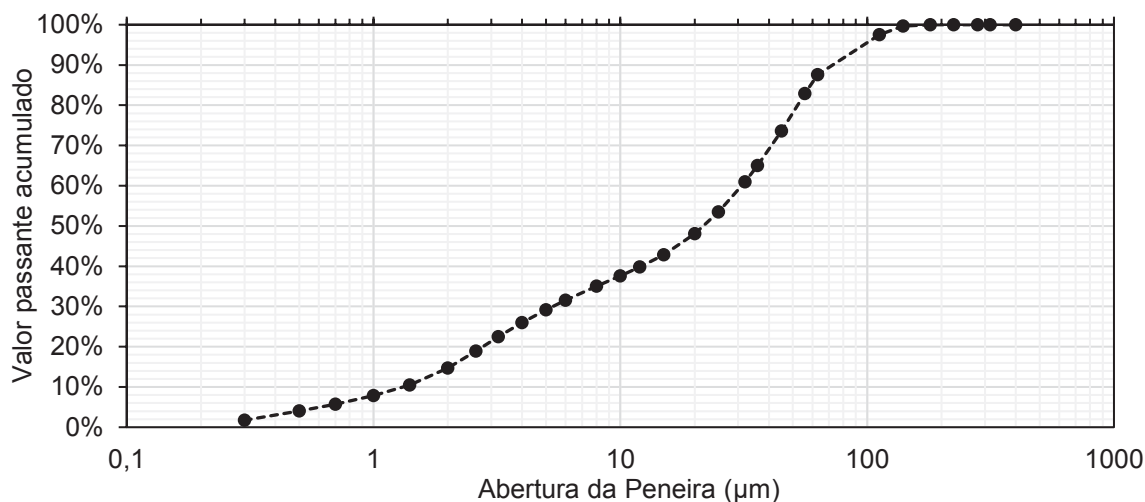
A cal hidratada escolhida foi a CH-III, cuja caracterização pode ser observada na TABELA 13 e na FIGURA 10.

TABELA 13 – PROPRIEDADES FÍSICAS DA CAL HIDRATADA CH-III

Característica	Resultado
Massa unitária	0,60 g/cm ³
Massa específica	2,78 g/cm ³

FONTE: O fabricante (2019).

FIGURA 10 – CURVA GRANULOMÉTRICA DA CAL HIDRATADA (CH-III).



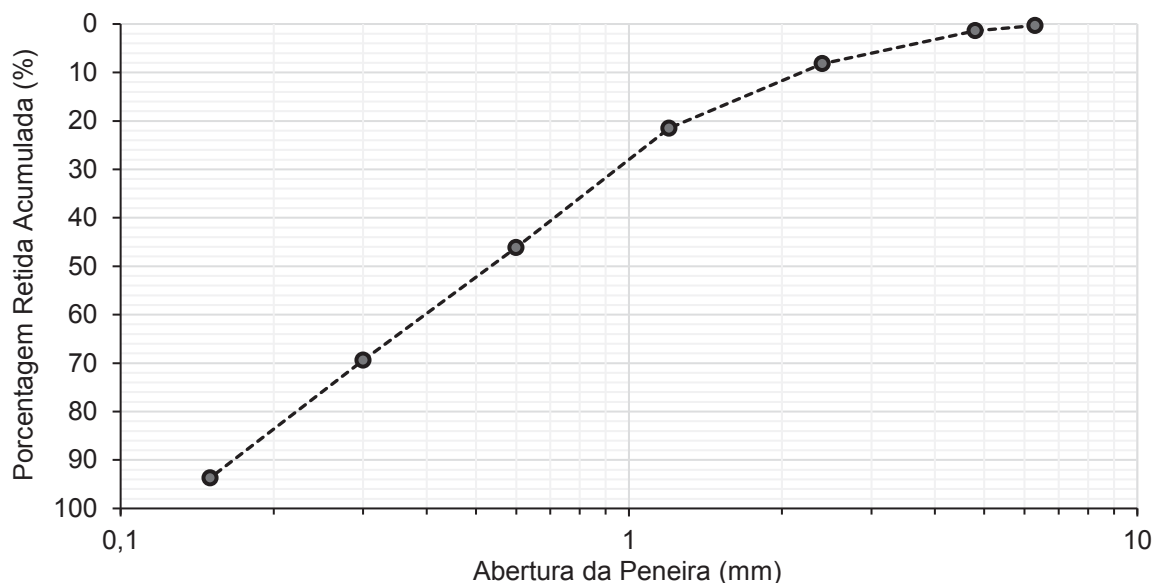
FONTE: O autor (2020).

4.3.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo empregado é uma areia média natural proveniente de rio, usualmente utilizada para argamassas de revestimento. A referida areia foi caracterizada fisicamente através da curva granulométrica, conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003), material pulverulento, vide NBR NM 46 (ABNT, 2003), massas

específicas e absorção de água, segundo NBR NM 53 (ABNT, 2009), tal como apresentado nas FIGURA 11 e TABELA 14. A areia foi previamente seca em estufa conforme procedimentos de caracterização indicados e, então, armazenada para fins de posterior utilização.

FIGURA 11 – CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO.



FONTE: O autor (2020).

TABELA 14 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO AGREGADO MIÚDO.

Característica	Valor médio	Norma
Material pulverulento	3,30%	NM 46:2003
Massa específica aparente	2,60 g/cm ³	NM 45:2006
Massa unitária	1,40 g/cm ³	NM 45:2006
Absorção de água	0,95%	NM 30:2001

FONTE: O autor (2020).

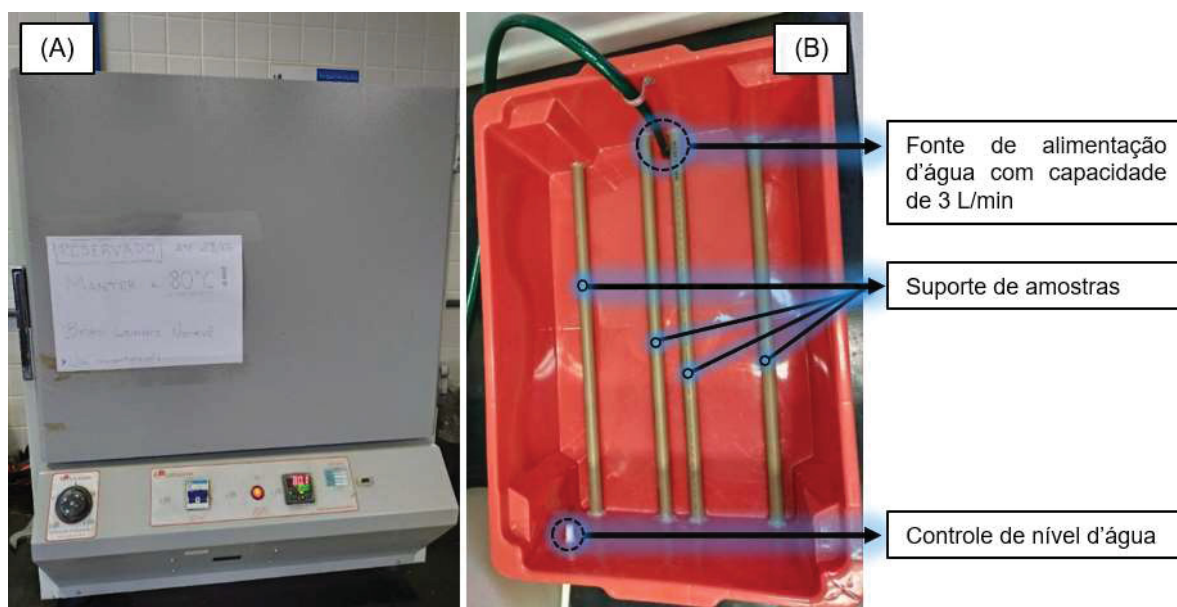
4.3.4 Argamassas industrializadas

Tal como dito anteriormente, foram selecionadas 3 argamassas industrializadas com aplicação múltiplo uso, denominadas como argamassas I-A, I-B e I-C. Para estas argamassas, a quantidade de água empregada na mistura é equivalente ao recomendado pelo fabricante. Esta relação está apresentada anteriormente na TABELA 9.

4.4 MÉTODOS

Esta etapa consistiu em aplicar, inicialmente, um procedimento que possibilitasse compreender o comportamento térmico de corpos de prova de argamassas submetidos à ação do calor em estufa (Etapa 1) e ao choque térmico (resfriamento) em reservatório (Etapa 2). Então, posteriormente definir, com respaldo nestes resultados, a configuração do método de verificação do comportamento de argamassas de revestimento frente à ação de calor e choque térmico. A FIGURA 12 ilustra os equipamentos utilizados para ambas as etapas.

FIGURA 12 – (A) ESTUFA E (B) RESERVATÓRIO UTILIZADOS NA CICLAGEM



FONTE: O autor (2020).

Para tal, foram utilizados corpos de prova prismáticos de dimensões 4x4x16 cm³ das argamassas de estudo, com 28 dias de idade, conduzidos às mesmas condições de temperatura e exposição do procedimento de referência da NBR 15575-4 (ABNT, 2013). Essas dimensões e formatos de amostra foram escolhidos em virtude de corresponderem à maioria das amostras desta pesquisa e, além disso, contemplarem diversos procedimentos de ensaios aplicáveis às argamassas, conforme normas nacionais vigentes.

Frisa-se inicialmente que a adaptação das dimensões se dá especialmente por razões de ordem técnica, econômica e ambiental, visando minimizar a geração

de resíduos decorrente da análise. Quanto à parte técnica, explica-se que a adaptação é resultado da intenção de viabilizar o emprego da avaliação de propriedades adotadas pela literatura e por normas como requisitos de desempenho para argamassas de revestimento. Assim, busca-se permitir realizar o procedimento de ciclagem de ação do calor e choque térmico em corpos de prova de argamassa que serão, em sequência, submetidos à avaliação de durabilidade.

Explica-se, ainda, que tal simplificação é possível tendo em vista que as tensões de origem térmica são decorrentes de variações dimensionais impedidas por restrições. Estas restrições, contudo, podem ser internas ou externas. No caso dos corpos de prova aplicados nesta pesquisa, o gradiente de temperatura imposto às diferentes faces da amostra resulta em tensões térmicas decorrentes de suas restrições internas.

Importante ressaltar, portanto, a adaptação quanto à escala de análise, que – para o método proposto – é laboratorial, através de corpos de prova prismáticos, diferentemente do procedimento de referência, cuja execução se dá em uma parede com dimensões em escala real. Ademais, a avaliação adaptada restringe-se à argamassa de revestimento, enquanto o método original do Anexo E da NBR 15575-4 (ABNT, 2013) contempla todos os elementos que compõem o SVVE. Portanto, trata-se de um procedimento complementar ao método de referência.

Além disso, a fixação da taxa de aquecimento decorrente do uso de estufa em temperatura constante resulta em maior padronização dos resultados. O mesmo ocorre para a etapa de resfriamento, onde a fixação da temperatura da água, associada ao fluxo constante (também determinado), confere maior homogeneidade às solicitações térmicas, padronizando os resultados.

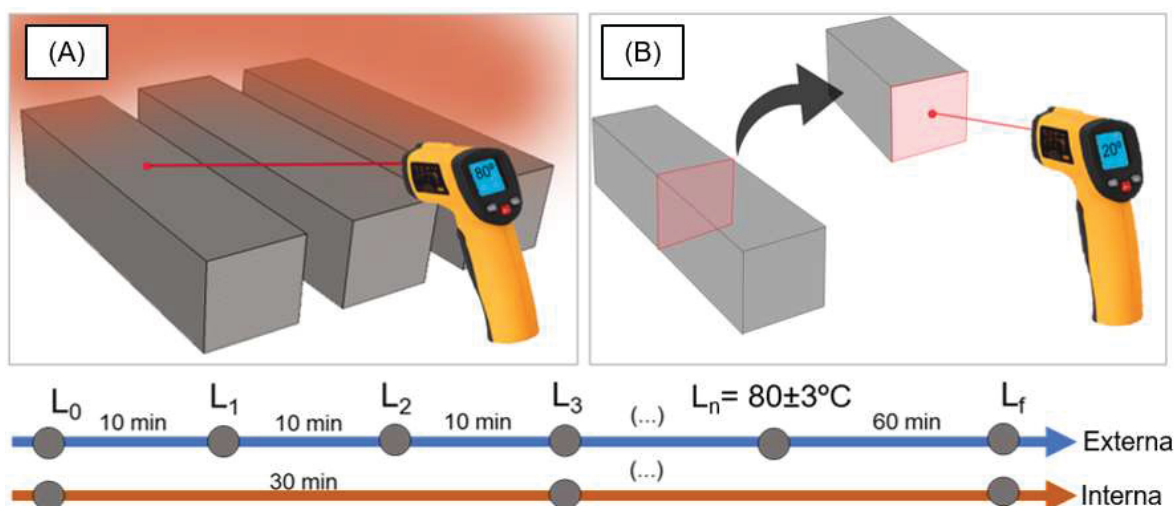
4.4.1 Etapa 1 - Aquecimento (ação de calor)

Primeiramente, as amostras foram colocadas em estufa à temperatura de 80°C (equivalente ao valor normativo e também amplamente empregado na literatura, vide TABELA 1), para aquecimento das mesmas. Este procedimento foi denominado Etapa 1.

Foram avaliadas as temperaturas externas (superficiais) por meio de leituras no centro da face superior da amostra, realizadas a cada 10 minutos, com uso de um termômetro digital a laser (precisão de $\pm 1,5^\circ\text{C}$), até a mesma atingir a

temperatura superficial especificada ($80 \pm 3^\circ\text{C}$). Igualmente, aferiu-se a temperatura interna dos corpos de prova (medidas no centro), com intervalo de leitura de 30 minutos – mais espaçado que o outro, tendo em vista a necessidade de rompimento dos CP's para estas leituras. Explica-se que, para leitura das temperaturas internas, as amostras foram rompidas ao meio – com plano de ruptura paralelo à face quadrada (menor face) das amostras. Após a determinação da temperatura interna, essas amostras rompidas foram descartadas. O procedimento de aferição da temperatura encontra-se ilustrado na FIGURA 13, no qual foram utilizados 9 (nove) corpos de prova por formulação (sendo três deles para ler temperaturas externas e seis para temperaturas internas).

FIGURA 13 – ILUSTRAÇÃO DE LEITURAS DE TEMPERATURA DAS AMOSTRAS EM ESTUFA DAS FACES EXTERNAS (A) E INTERNAS (B), COM RESPECTIVA LINHA DO TEMPO



FONTE: O autor (2020).

A temperatura adotada é a mesma proposta pela norma. A alteração do meio de aquecimento, contudo, é justificada pela possibilidade de padronização do aquecimento, que se dá de forma mais uniforme com uso da estufa, além de viabilizar uma taxa de aquecimento padrão – o que não ocorre necessariamente no caso do uso do painel radiante. Além disso, a estufa é um equipamento comumente encontrado em laboratórios de pesquisa, diferentemente de painéis radiantes.

Após estas leituras, realizou-se ainda uma última medida, com tempo equivalente à 1 hora de permanência em estufa após as amostras atingirem (80 ± 3)°C, tal como preconiza a norma de desempenho em seu ensaio de ação de

calor e choque térmico. Ou seja, instante equivalente ao momento em que as amostras completam uma hora em estufa, após atingirem superficialmente a temperatura de $(80\pm3)^{\circ}\text{C}$. Para este momento, aferiu-se também leitura de temperaturas interna e externa.

4.4.2 Etapa 2 - Resfriamento (choque térmico)

Sequencialmente, procedeu-se com o estudo do comportamento térmico ao longo do resfriamento das amostras até $(20\pm3)^{\circ}\text{C}$ (etapa 2) – temperatura equivalente à norma NBR 15575-4 (ABNT, 2013b), sendo este procedimento denominado como Etapa 2.

Desse modo, cada uma das formulações de argamassas foi conduzida (imediatamente após a Etapa 1) a um reservatório com água em temperatura controlada à $(20\pm3)^{\circ}\text{C}$ (FIGURA 14) e fluxo constante de aproximadamente 3 L/min, mesma vazão proposta por Oliveira *et al.* (2014) e condizente com as normas ISO 8.336 (2009) e ASTM C1185-8 (2012). O fluxo d'água foi aplicado para fins de manter constante a temperatura da água do reservatório, tal como será apresentado adiante para os parâmetros de ciclagem. O referido reservatório foi projetado de modo a acomodar corpos de prova das dimensões $4\times4\times16\text{ cm}^3$ e $2,5\times2,5\times28,5\text{ cm}^3$, possibilitando imersão completa (CP's totalmente submersos) ou parcial (CP's submersos somente até certa altura). Um projeto detalhado do reservatório em questão encontra-se disponível no APÊNDICE 1. As dimensões das amostras citadas foram escolhidas com base nas configurações de ensaios normatizados que permitem a avaliação de propriedades consideradas essenciais em termos de durabilidade.

FIGURA 14 – CONTROLE DE TEMPERATURA DE ÁGUA NO INTERIOR DO RESERVATÓRIO



FONTE: O autor (2020).

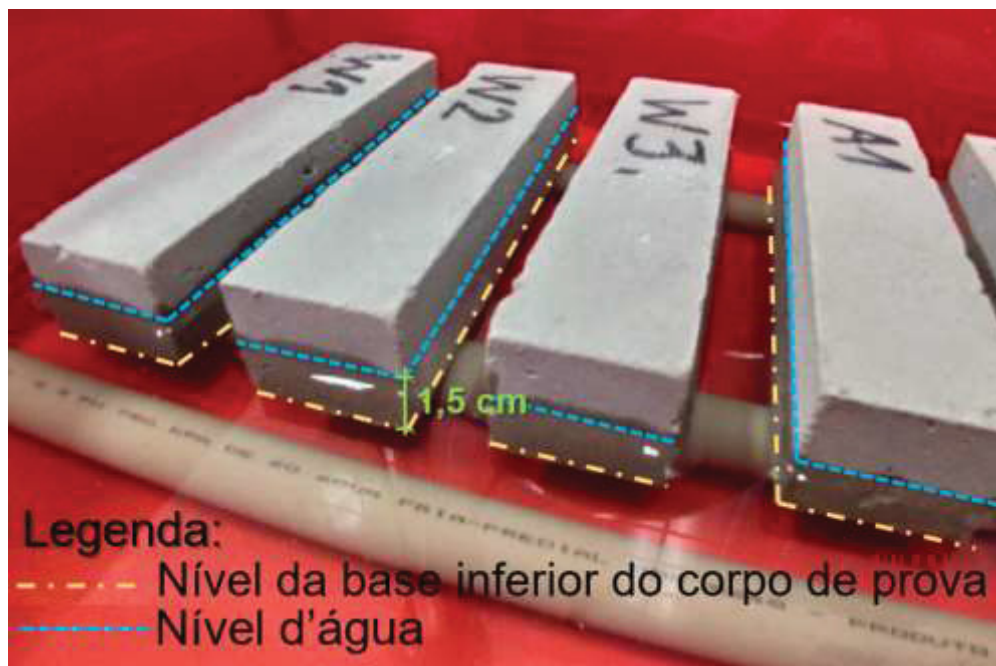
O procedimento empregado para a Etapa 2 é, de modo geral, análogo ao aplicado para a ação do calor (etapa 1), aferindo a temperatura das amostras ao longo do tempo. Contudo, estudaram-se duas configurações de resfriamento distintas: imersão completa (resfriamento tipo 1) e imersão parcial (resfriamento tipo 2), de modo a definir qual a configuração seria empregada pelo método proposto. A FIGURA 15 e a FIGURA 16 representam os dois tipos de resfriamento mencionados (imersão completa e parcial), respectivamente, com as amostras acondicionadas no reservatório desenvolvido para tal. A altura da coluna d'água para o resfriamento tipo 1, considerada a partir da base inferior do corpo de prova, é de 3,0 cm, enquanto para o resfriamento tipo 2 equivale a 1,5 cm. Explica-se que esta última altura foi adotada pois representa a espessuras de revestimento praticáveis em obras reais e, também, permite o uso para ambas as dimensões de amostras aplicadas no estudo: $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ e $2,5 \times 2,5 \times 28,5 \text{ cm}^3$.

FIGURA 15 – CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS AO RESFRIAMENTO POR IMERSÃO COMPLETA (RESFRIAMENTO TIPO 1)



FONTE: O autor (2020).

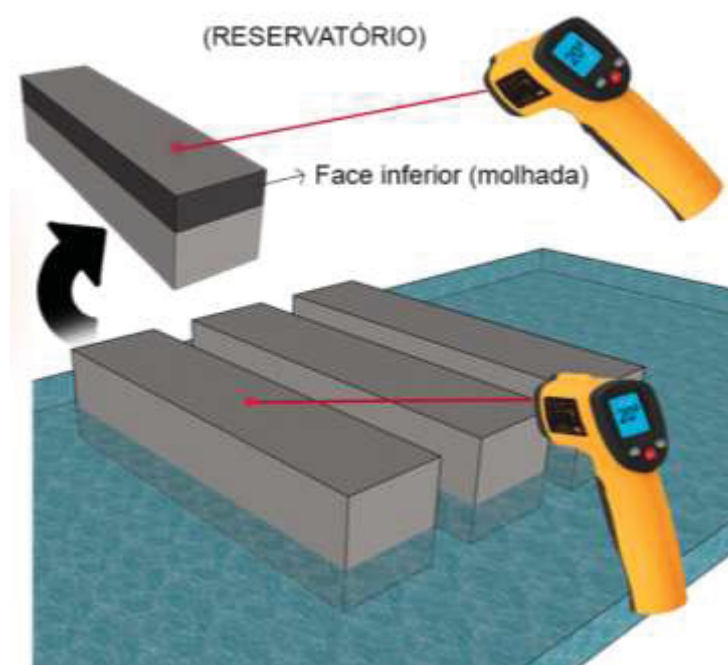
FIGURA 16 – CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS AO RESFRIAMENTO POR IMERSÃO PARCIAL (RESFRIAMENTO TIPO 2)



FONTE: O autor (2020).

Assim, para a imersão completa (resfriamento tipo 1) aferiram-se as temperaturas internas e externas (superficiais) e, por outro lado, para a imersão parcial (resfriamento tipo 2) as temperaturas superficiais da face em contato com a água e da face oposta (superfície seca), vide FIGURA 17. Os tempos de leitura de temperatura deste procedimento (Etapa 2) foram intervalados de 5 minutos entre si, tendo em vista que o resfriamento demonstrou ocorrer de maneira mais rápida que o aquecimento. Reitera-se que as amostras foram previamente aquecidas conforme ação do calor definida em Etapa 1.

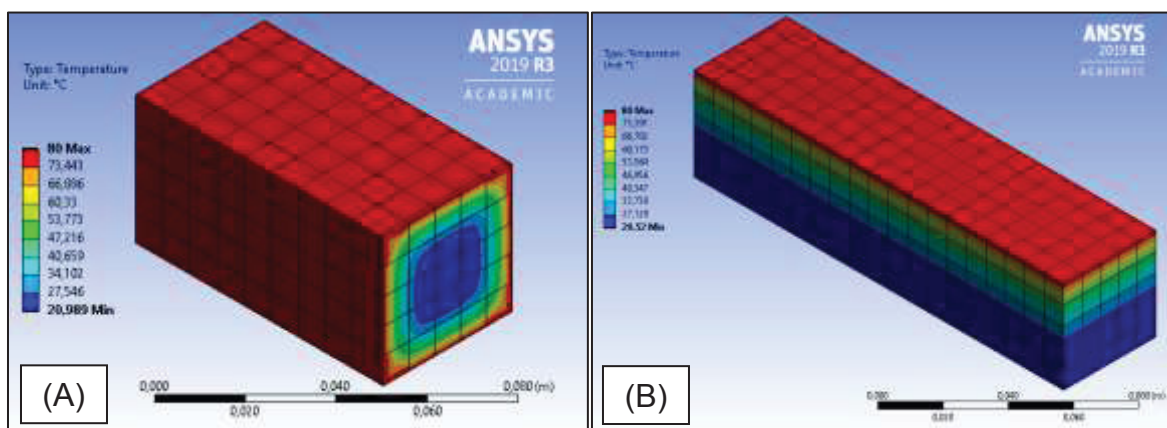
FIGURA 17 – ILUSTRAÇÃO DE LEITURA DE TEMPERATURA DOS CP'S EM RESFRIAMENTO TIPO 2.



FONTE: O autor (2020).

Desse modo, foi possível obter o gradiente de temperatura para cada configuração de resfriamento. A FIGURA 18 ilustra, de maneira gráfica – através de modelagem computacional pelo *software* ANSYS® – uma simulação genérica de variação de temperatura no corpo de prova, tanto para a etapa de aquecimento quanto para resfriamento.

FIGURA 18 – ILUSTRAÇÃO DA SITUAÇÃO DE TEMPERATURA DOS CORPOS DE PROVA DURANTE (A) AQUECIMENTO E (B) RESFRIAMENTO POR IMERSÃO PARCIAL



FONTE: O autor (2020).

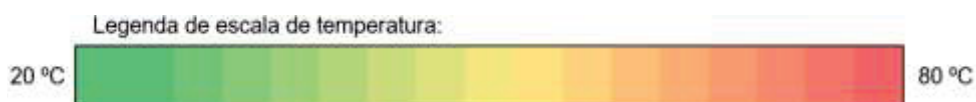
4.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.5.1 Etapa 1 - Aquecimento (ação de calor)

A TABELA 15 apresenta os resultados da etapa de aquecimento para as argamassas I de revestimento, com a variação de temperatura ao longo do tempo. Em posse dos resultados expostos, nota-se que as argamassas apresentaram, entre si, um comportamento consideravelmente similar em termos de variação de temperatura. Para tal, infere-se que o tempo necessário para que todas as formulações atinjam externamente $(80 \pm 3)^{\circ}\text{C}$, ou seja, ao menos 77°C , é equivalente à 90 minutos (1 hora 30 minutos em estufa). Assim, como o procedimento de referência da NBR 15575-4 (ABNT, 2013) prescreve que a etapa de aquecimento perdure por mais 60 minutos após este instante, estendeu-se as leituras de modo que última leitura foi realizada 1 hora após os 90 minutos iniciais, ou seja, com tempo total decorrido de 150 minutos (2 horas e 30 minutos em estufa). De antemão, observa-se um possível indicativo de tendência de padronização do tempo necessário para a etapa de aquecimento, independentemente da argamassa empregada.

TABELA 15 – MEDIDAS DE TEMPERATURA AO LONGO DA ETAPA DE AQUECIMENTO PARA AS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

Tempo (min)	Temperatura Externa (°C)						Temperatura Interna (°C)					
	I-A	I-B	I-C	S-C	M-1	M-2	I-A	I-B	I-C	S-C	M-1	M-2
0	25,0	24,7	25,0	23,5	23,0	22,8	25,0	24,7	25,0	25,0	21,1	21,0
10	47,8	46,8	44,8	42,5	39,4	42,4	34,4	34,1	34,0	34,0	29,5	28,5
20	57,4	56,2	52,9	55,5	50,9	55,7	43,8	42,7	43,2	43,2	37,9	36,0
30	64,5	61,1	60,9	64,6	59,3	63,8	53,2	52,1	52,2	52,2	46,3	43,5
40	69,1	66,2	65,0	68,2	63,3	67,2	58,6	57,7	58,5	58,5	54,6	51,0
50	72,6	69,4	68,4	71,9	67,4	70,7	64,0	63,4	64,7	64,7	63,0	58,5
60	75,8	73,4	75,0	75,5	71,4	74,1	69,4	69,0	71,0	71,0	71,4	66,0
70	76,4	74,6	75,3	76,7	73,6	75,8	71,8	71,1	72,3	72,3	73,6	69,5
80	77,6	75,6	76,0	78,0	75,8	77,5	74,2	73,2	73,6	73,6	75,7	73,1
90	78,3	77,5	77,6	79,2	77,2	79,2	76,7	75,3	74,9	74,9	77,9	76,6
100	79,4	78,9	79,3	79,4	78,3	79,4	77,2	76,0	76,1	76,1	78,2	77,0
110	79,3	78,3	79,1	79,5	78,5	79,6	77,7	76,8	77,2	77,2	78,5	77,5
120	80,0	79,2	79,4	79,7	78,8	79,7	78,2	77,6	78,4	78,4	78,9	77,9
150	80,0	79,7	79,9	80,2	79,5	80,2	79,4	79,2	79,4	79,4	79,8	79,2



FONTE: O autor (2020).

4.5.2 Etapa 2 - Resfriamento (choque térmico)

Sequencialmente, na TABELA 16 e a TABELA 17 estão retratados os valores aferidos para a etapa de resfriamento, para imersão completa (resfriamento tipo 1) e imersão parcial (resfriamento tipo 2).

TABELA 16 – MEDIDAS DE TEMPERATURA AO LONGO DA ETAPA DE RESFRIAMENTO TIPO 1 (IMERSÃO COMPLETA) PARA AS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

Tempo (min)	Temperatura externa (°C)						Temperatura interna (°C)					
	I-A	I-B	I-C	S-C	M-1	M-2	I-A	I-B	I-C	S-C	M-1	M-2
0	80,0	79,2	79,4	80,3	79,7	80,4	78,2	77,6	78,4	77,8	77,2	78,7
5	21,6	22,9	22,7	21,9	24,1	24,7	40,6	41,2	41,1	43,2	43,0	42,7
10	19,9	19,9	19,9	19,9	22,2	22,7	23,5	23,5	23,5	24,7	24,8	24,8
15	19,1	19,1	19,1	19,7	21,9	22,5	21,9	21,9	21,9	23,1	23,4	23,2
20	19,1	19,0	19,1	19,6	21,8	22,4	21,6	21,6	21,6	22,9	24,6	23,3
25	19,1	19,0	19,3	19,4	21,7	22,2	21,5	21,5	20,8	22,5	23,9	22,2
30	19,1	19,0	19,3	19,3	21,6	22,0	21,4	21,4	20,8	22,1	23,9	21,4

Legenda de escala de temperatura:



FONTE: O autor (2020).

TABELA 17 – MEDIDAS DE TEMPERATURA AO LONGO DA ETAPA DE RESFRIAMENTO TIPO 2 (IMERSÃO PARCIAL) PARA AS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

Tempo (min)	Temperatura na face inferior (°C)						Temperatura na face superior (°C)					
	I-A	I-B	I-C	S-C	M-1	M-2	I-A	I-B	I-C	S-C	M-1	M-2
0	79,4	79,2	79,4	79,4	79,8	79,2	80,0	79,7	79,9	80,2	79,5	80,2
5	20,9	23,0	21,3	21,3	23,4	24,6	58,2	57,5	56,2	54,7	55,2	56,1
10	20,2	21,0	20,0	20,0	21,6	22,6	40,0	40,8	38,4	36,1	41,0	40,9
15	20,1	20,9	19,8	19,8	21,5	22,5	28,0	29,1	26,5	30,4	34,2	32,2
20	20,0	19,8	19,8	19,8	21,4	22,5	23,5	24,7	22,0	22,2	23,1	25,1
25	19,9	19,4	19,8	19,8	21,0	22,0	22,0	23,2	20,6	21,1	21,7	21,0
30	19,9	19,3	19,8	19,8	20,4	21,5	21,4	22,7	20,3	20,9	21,1	20,9

Legenda de escala de temperatura:



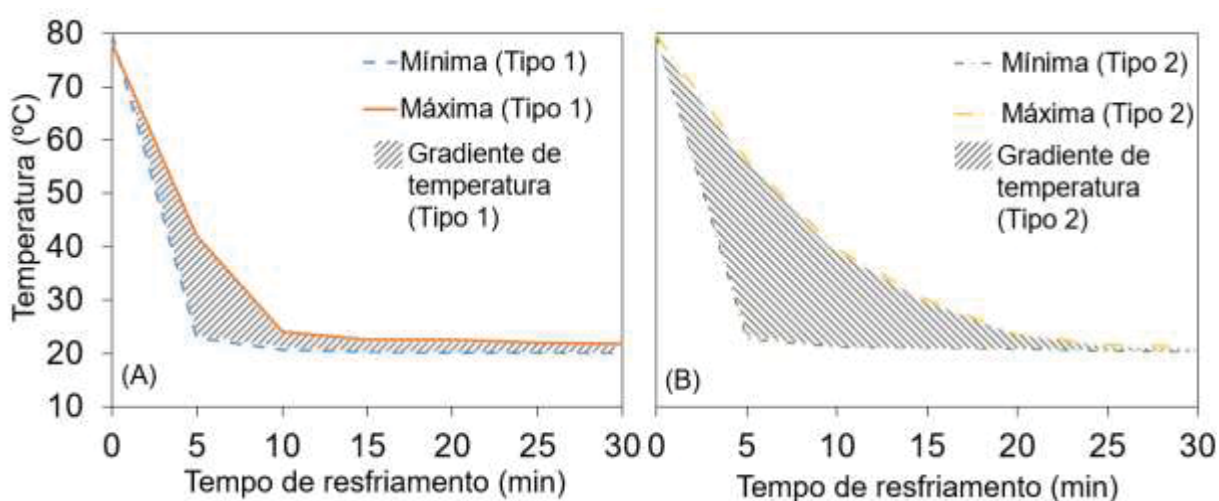
FONTE: O autor (2020).

Observa-se que o resfriamento ocorre de maneira mais rápida que o aquecimento. Destarte, verificou-se que 30 (trinta) minutos é o intervalo de tempo necessário para que todas as temperaturas médias atinjam $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ em ambas as configurações de resfriamento analisadas, pelo qual realizou-se a aferição de temperatura até este instante.

Comparando os dados expostos na TABELA 16 e na TABELA 17, observa-se que o resfriamento tipo 1 (imersão completa) reduz mais rapidamente as temperaturas internas e externas. Contudo, o resfriamento tipo 2 (imersão parcial) implica em maiores gradientes de temperatura. Tal constatação pode ser observada

na FIGURA 19, que apresenta as médias de variação de temperatura ao longo do tempo para os dois extremos aferidos em cada configuração. As áreas hachurada destacadas, calculadas através de integração, equivalem a aproximadamente: (A) 145°C.min; e (B) 334°C.min. Assim, o resfriamento tipo 2 possui um gradiente térmico da ordem de 130% superior em relação ao resfriamento tipo 1.

FIGURA 19 – GRADIENTES MÉDIOS DE TEMPERATURA PARA O (A) RESFRIAMENTO TIPO 1 E (B) RESFRIAMENTO TIPO 2



FONTE: O autor (2020).

Por esta razão, o resfriamento tipo 2 (imersão parcial) foi selecionado para ser empregado na ciclagem proposta, já que esta configuração resultou em um maior gradiente de temperatura ao longo da amostra, implicando – portanto – em maior solicitação em termos de choque térmico. Além disso, é a configuração que melhor retrata a situação real de uma argamassa de revestimento aplicada em um sistema de vedação vertical externo. Ou seja, é mais condizente com o que ocorre em uma situação de precipitação de chuva, por exemplo, onde somente uma face entra em contato com a água e é resfriada bruscamente. Dessa forma, doravante, ao tratar-se da etapa de resfriamento, para fins do método proposto, se remeterá ao resfriamento tipo 2, exclusivamente.

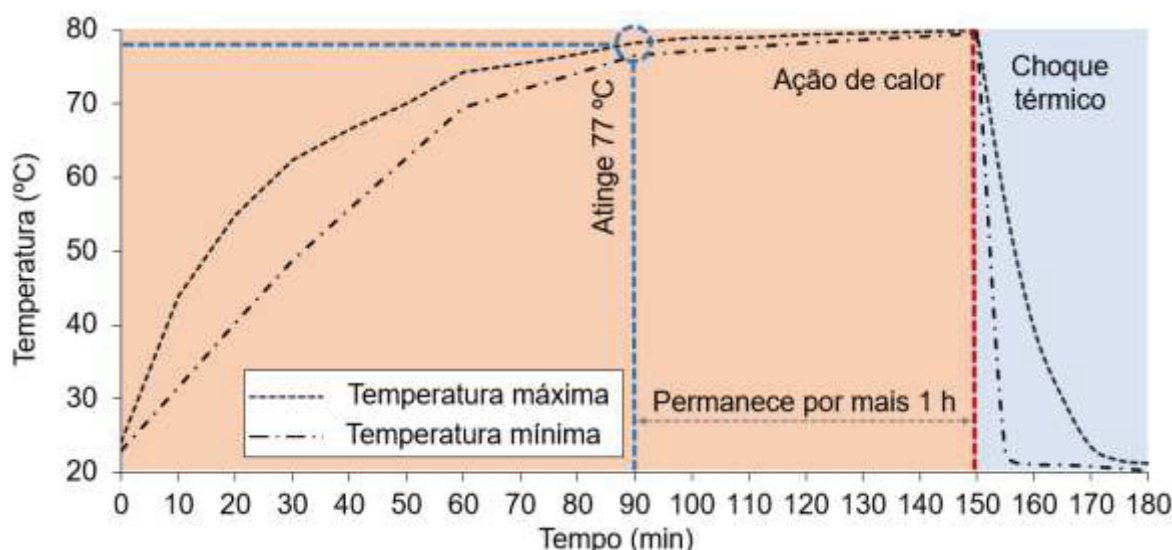
Explica-se que se fixou o tempo para a etapa de resfriamento em 30 minutos, embasado no tempo necessário para todas as formulações atingirem a temperatura $(20 \pm 3)^{\circ}\text{C}$, especificada pela NBR 15575-4 (ABNT, 2013), em ambas as

faces de leitura. Ou seja, garantindo estabilidade de temperatura dentro da margem de variação de temperatura tolerada para todas as argamassas.

Finalmente, resume-se em FIGURA 20 a variação de temperatura ao longo da ciclagem de ação de calor e choque térmico, tal que os intervalos de tempo das etapas de ciclagem, definidos para todas as formulações de estudo, equivalem a:

- Aquecimento (ação de calor): 150 minutos em estufa;
- Resfriamento tipo 2 (choque térmico): 30 minutos em reservatório.

FIGURA 20 – TEMPERATURA MÉDIA AO LONGO DO PROCEDIMENTO COMPLETO DE AÇÃO DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTP



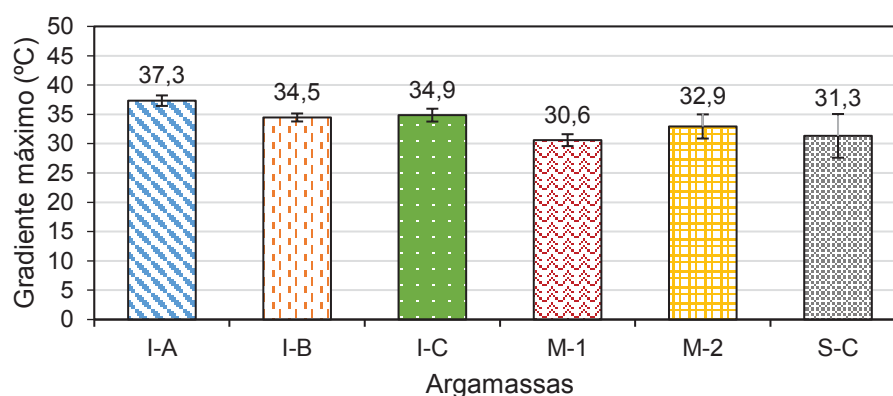
FONTE: O autor (2020).

Além disso, com respaldo nas argamassas de revestimento ensaiadas, há indícios para padronização destes intervalos de tempo no que tange à proposição de um procedimento de ensaio. Entende-se, ainda, que fixar o tempo equivale a padronizar também a solicitação imposta às formulações ensaiadas, conforme sugerem também Kazmierczak *et al.* (2016) para o ensaio contido no Anexo da NBR 15575-4 (ABNT, 2013). Explica-se que a velocidade de aquecimento pode ser considerada como uma resposta de desempenho da argamassa, decorrente de suas características termofísicas, reforçando, deste modo, a fixação de um intervalo de tempo padrão para todas as argamassas durante as etapas da ciclagem. Consolidando a presente discussão, a norma americana C1185-8 (ASTM, 2012) aplica leitura indireta de temperatura através de uma placa metálica preta padrão,

visando padronizar a energia de aquecimento. Dessa forma – independentemente do comportamento do material ensaiado frente ao aquecimento – a solicitação térmica imposta é equivalente.

Em posse dos dados apresentados anteriormente na TABELA 15 e na TABELA 17, foi possível determinar os máximos gradientes de temperatura ao longo da ciclagem definida para todas as formulações de estudo. Tal resultado é apresentado em forma gráfica na FIGURA 21.

FIGURA 21 – MÁXIMO GRADIENTE DE TEMPERATURA DAS ARGAMASSAS AO LONGO DA CICLAGEM DE AÇÃO DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO



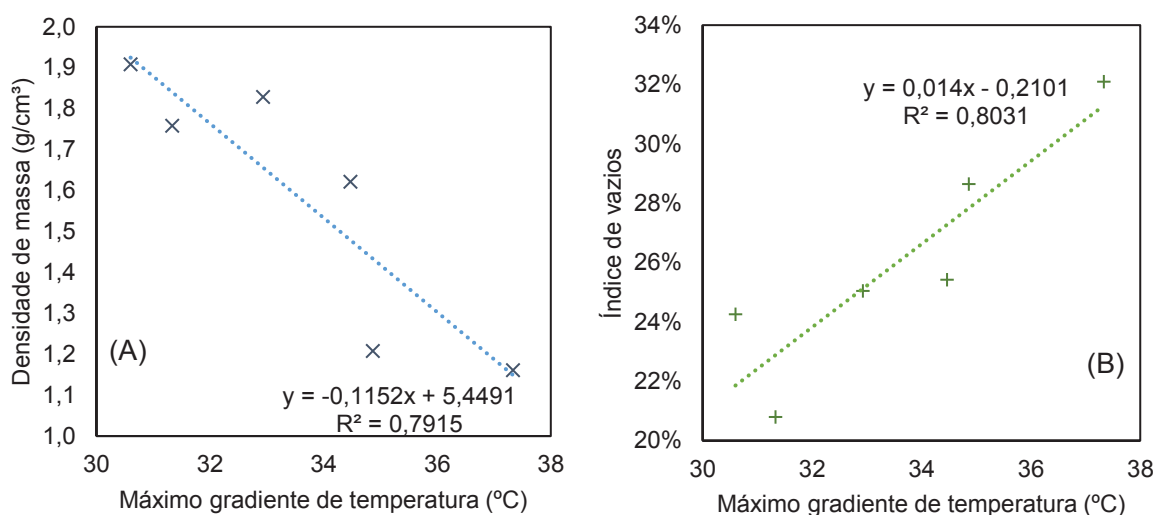
FONTE: O autor (2020).

Conforme esperado, o pico de gradiente máximo ocorreu no início da etapa de resfriamento (choque térmico), equivalente à leitura de 155 minutos de ciclagem. Não obstante, ressalta-se que a etapa de aquecimento, por meio da diferença de temperatura externa e interna também representa um considerável gradiente, o qual igualmente solicita o revestimento em questão.

Deste modo, embora os dois grupos (industrializadas e tradicionais) tenham apresentado tempos equivalentes para as etapas de ciclagem, observa-se que as industrializadas apresentaram maiores picos de gradientes de temperatura. Conforme resultados apresentados adiante em itens subsequentes, há distinta caracterização entre os grupos de argamassa. Assim, assume-se que possivelmente as características físicas (porosidade e densidade) influenciaram na velocidade em que o calor conseguiu elevar a temperatura no interior das amostras, diferenciando-a de forma mais significativa da temperatura na superfície e, deste modo, resultando em maior gradiente de temperatura. Visando embasar a

discussão explanada, apresenta-se a FIGURA 22, que demonstra a correlação existente entre o máximo gradiente de temperatura aferido para cada formulação com a respectiva (A) densidade de massa e (B) índice de vazios (com R^2 equivalente a 79% e 80%, respectivamente) adiante apresentados.

FIGURA 22 – CORRELAÇÃO DO MÁXIMO GRADIENTE DE TEMPERATURA COM (A) DENSIDADE DE MASSA E (B) ÍNDICE DE VAZIOS



FONTE: O autor (2020).

Infere-se, portanto, que o máximo gradiente de temperatura foi inversamente proporcional à densidade e diretamente proporcional ao índice de vazios. As argamassas menos densas e mais porosas (como é o caso das industrializadas) resultaram em maior gradiente térmico máximo. Esta observação corrobora o estudo de Roriz (2008), que afirma que materiais porosos geralmente são bons isolantes, pois o ar possui baixa condutividade, de modo que é possível assimilar uma relação diretamente proporcional entre a massa específica de um dado material com sua condutividade térmica. Além disso, argamassas mais densas possuem, para um mesmo volume, maior quantidade de massa, armazenando, portanto, maior quantidade de calor. Destarte, o gradiente de temperatura tende a ser mais elevado para argamassas mais porosas, haja vista que a variação de temperatura interna (ou na face oposta) ocorre de maneira mais lenta.

Ressalva-se, de antemão, que – para fins de comparação de diferentes argamassas – um maior gradiente térmico não reflete necessariamente em maior solicitação no que tange às tensões térmicas, uma vez que este fenômeno também

está correlacionado a algumas propriedades de cada material, tal como coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade e coeficiente de dilatação térmica, além de outros fatores externos, como o tipo de restrição de movimentação imposta. Todavia, é importante frisar que para o mesmo material, um maior gradiente térmico corresponde a uma maior tensão térmica, se mantidas as demais condições de contorno.

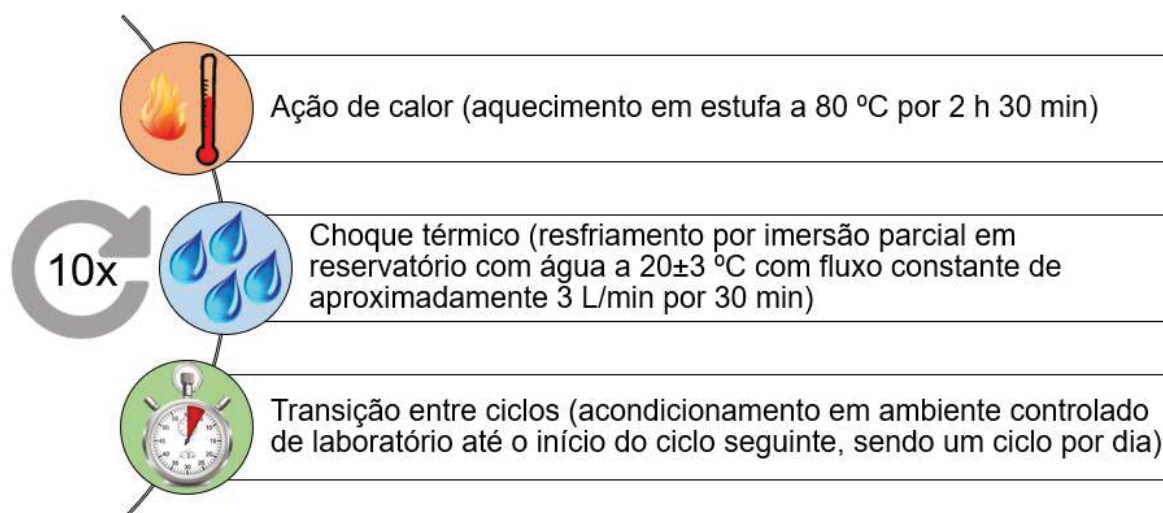
4.5.3 Método proposto

Neste item, apresenta-se o método de ciclagem adaptado (baseado no procedimento normativo do Anexo E da NBR 15575-4) proposto. Para tal, com base nos procedimentos preliminares (Etapa 1 e Etapa 2), anteriormente explanados, descreve-se a configuração definida.

Reitera-se que a ciclagem do Anexo E da NBR 15575-4 (ABNT, 2013) consiste em submeter as amostras a 10 ciclos de ação de calor e choque térmico, valor mantido neste estudo. Por outro lado, a ciclagem adaptada segue os procedimentos descritos nos itens 4.4.1 e 4.4.2. Propõe-se, ainda, realizar uma transição entre ciclos, de modo que ao finalizar um ciclo, os corpos de prova sejam acondicionados em ambiente com condições de laboratório controladas (U.R.: $60\pm 5\%$; T: $23\pm 5^{\circ}\text{C}$) por um intervalo de tempo necessário para que o ciclo subsequente inicie 24 horas após o ciclo imediatamente antecessor, resultando em 1 (um) ciclo por dia. Destaca-se que o procedimento de referência não especifica tal ação. O intuito de incluir esta etapa é padronizar ao máximo a execução dos ensaios, conferindo – assim – maior representatividade quanto aos resultados obtidos. Ademais, a transição – por meio do tempo de acondicionamento ao ar – permite que as amostras retornem a um estado mais próximo do natural (umidade e temperatura) antes de serem novamente submetidas ao ciclo seguinte.

Objetivando elucidar quaisquer dúvidas e facilitar a compreensão, apresenta-se inicialmente – na FIGURA 23 – o fluxograma completo do método proposto, desde as definições preliminares até a avaliação de durabilidade.

FIGURA 23 – DIAGRAMA SINTÉTICO DE CICLAGEM DO MÉTODO DE ENSAIO ADAPTADO DE AÇÃO DO CALOR E CHOQUE TÉRMICO



FONTE: O autor (2020).

Destaca-se que é apresentado, no APÊNDICE 1, um documento orientativo para execução completa do procedimento, englobando não só a ciclagem (ora tratada), mas toda a posterior avaliação decorrente da verificação do comportamento das argamassas, com devidas adequações após desenvolvimento completo deste estudo, decorrentes das discussões e análises explanadas adiante. Portanto, frisa-se que o procedimento apresentado no presente item se restringe especificamente à ciclagem de ação de calor e choque térmico em si, distinguindo em alguns aspectos da proposta final apresentada no APÊNDICE 1, definida com respaldo nas discussões arguidas ao longo deste documento, que contempla o método completo.

Para replicação do método, vale ressaltar que a idade com que as amostras são submetidas à ciclagem deve variar conforme a especificidade de cada tipo de formulação. Para formulações convencionais, a idade de 28 dias – tal como prescrito no ensaio normatizado – é indicada. Contudo, algumas formulações especiais podem conter algumas particularidades e diferentes idades podem ser adotadas, desde que justificadas tecnicamente.

Apresenta-se na TABELA 18 um breve comparativo entre os parâmetros de ensaio fixados pela norma e os sugeridos pelo autor (para fins de proposta de método adaptado) no que tange à ciclagem.

TABELA 18 – COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DE CICLAGEM DE AÇÃO DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO PROPOSTO E O NORMATIZADO

Item	Anexo E (NBR 15575-4)	Método adaptado (NENEVÊ)	Situação
Amostras	Pé direito x Espessura x (1,20 ± 0,20 m)	4x4x16 cm³ + 2,5x2,5x28,5 cm³	Alterado
Temperatura superficial máxima de aquecimento	(80±3)°C	(80±3)°C	Mantido
Tempo de aquecimento	Variável (necessário para atingir (80±3)°C)	Variável (o necessário para atingir (80±3)°C).	Mantido
Tempo em temperatura máx.	1 h	1 h	Mantido
Método de Aquecimento	Painel radiante	Estufa à 80°C	Alterado
Aferição de temperatura	5 termopares	1 Termômetro infravermelho laser	Alterado
Método de Resfriamento	Aspersão	Imersão parcial	Alterado
Tempo de Resfriamento	Variável (o necessário para atingir (20±3)°C).	Variável (o necessário para atingir (20±3)°C).	Mantido
Temperatura da água	Não especificado	(20±3)°C	Alterado
Temperatura superficial mínima de resfriamento	(20±3)°C	(20±3)°C	Mantido
Número de ciclos	10	10	Mantido
Transição entre ciclos	Não especificado	Ciclo seguinte inicia 24 h após o início do ciclo anterior (1 ciclo por dia)	Alterado
Idade de ensaio (início da ciclagem)	28 dias (a contar da moldagem)	28 dias (a contar da moldagem)	Mantido
Volume de material ensaiado	≈ 1,15 m³	≈ 0,02 m³	Alterado

FONTE: O autor (2020).

4.6 CONCLUSÕES

Tendo em vista os objetivos delineados inicialmente, assim como os resultados e discussões expostos no presente trabalho, são apresentadas neste item as principais conclusões deste capítulo. A partir dos resultados obtidos através dos métodos descritos no programa experimental, conclui-se que:

- foi possível propor um método de ensaio adaptado para ciclagem de ação de calor e choque térmico. Foram mantidas as temperaturas (80°C para ação de calor e 20°C para choque térmico, por resfriamento com água) e o número de ciclos do procedimento prescrito no Anexo E da norma de desempenho NBR 15575-4 (ABNT, 2013);
- as adaptações do método proposto contemplam as seguintes alterações: sistema avaliado (argamassas de revestimento); dimensões das amostras

(escala laboratorial); aferição da temperatura por termômetro laser infravermelho; resfriamento por imersão parcial; especificação da temperatura da água utilizada para resfriamento ($20\pm 3^{\circ}\text{C}$); e inclusão de etapa de transição entre ciclos;

- há uma tendência de padronização de intervalo de tempo necessário para que as argamassas de revestimento atinjam a temperatura externa de $(80\pm 3)^{\circ}\text{C}$, equivalente à 1 hora e 30 minutos para o método proposto;
- o resfriamento tipo 2 (imersão parcial) resultou em maiores gradientes térmicos em comparação ao resfriamento tipo 1 (imersão completa). Além disso, a imersão parcial é a configuração que melhor retrata a situação real de uma argamassa de revestimento aplicada em um sistema de vedação vertical externo. Por esta razão, o resfriamento tipo 2 (imersão parcial) foi selecionado para ser empregado na ciclagem proposta;
- a variação de temperatura na etapa de resfriamento das argamassas demonstrou ocorrer de maneira mais acentuada em comparação à etapa de aquecimento. Dessa forma, o intervalo de tempo necessário para que todas as argamassas de revestimento atinjam a temperatura de $(20\pm 3)^{\circ}\text{C}$ em ambas as faces de leitura é de 30 minutos (resfriamento tipo 2).

5 APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

5.1 VARIÁVEIS DA PESQUISA

As variáveis independentes; parâmetros fixos e variáveis dependentes deste capítulo são apresentados na TABELA 7 e na TABELA 8.

TABELA 19 – VARIÁVEIS INDEPENDENTES E PARÂMETROS FIXOS DA PESQUISA

Tipo	Parâmetros	
Variáveis independentes	Tipos de aglomerante	Cimento Portland CP II-F-32 Cal Hidratada CH-III
	Traços em volume	1:2 (cal:areia) 1:1:6 (cimento:cal:areia) 1:2:9 (cimento:cal:areia)
	Argamassas industrializadas	I-A I-B I-C
	Idade e exposição	28 dias (sem ciclagem) 42 dias (sem ciclagem) 42 dias (com ciclagem)
Parâmetros fixos	Tipo de Agregado	Areia (agregado mineral)
	Procedimento de mistura	NBR 16541 (ABNT, 2016)
	Procedimento de cura	Ambiente de laboratório
	Ciclagem	Ação de calor e choque térmico

FONTE: O autor (2020).

TABELA 20 – VARIÁVEIS DEPENDENTES DA PESQUISA

Variáveis dependentes
Densidade de massa aparente
Teor de ar incorporado
Densidade de massa aparente
Absorção de água por imersão
Índice de vazios
Coefficiente de capilaridade
Resistência à tração na flexão
Resistência à compressão axial

Variáveis dependentes
Módulo de elasticidade dinâmico
Variação dimensional
Coefficiente de dilatação térmica linear

FONTE: O autor (2020).

5.2 FORMULAÇÕES

As formulações de argamassa de revestimento aplicadas neste capítulo são as mesmas descritas em item 4.2.

5.3 MATERIAIS

Os materiais empregados para fins deste capítulo equivalem aos descritos e caracterizados em item 4.3.

5.4 MÉTODOS

Este item trata da aplicação do método de ação de calor e choque térmico proposto (vide item 4.5.3) e posterior verificação do comportamento das argamassas de revestimento frente a esta solicitação.

Primeiramente, portanto, foi realizada a caracterização das argamassas nos estados fresco e endurecido, sem aplicar a ciclagem. Então, paralelamente, todas as formulações de argamassas de revestimento também foram submetidas ao procedimento de ação de calor e choque térmico. Posteriormente, verificou-se o comportamento destas, através de propriedades no estado endurecido, e avaliou-se o desempenho frente à exposição ao método adaptado proposto. Em suma, esta etapa do programa experimental conta com três instantes distintos de caracterização das formulações:

- 28 dias de idade (caracterização padrão);
- 42 dias de idade (sem ciclagem);
- 42 dias de idade (com ciclagem).

Ademais, em termos de validação dos resultados obtidos em todo o estudo definitivo, foi utilizada análise estatística. Finalmente, realizou-se, ainda, um estudo de viabilidade do método proposto em termos técnicos, econômicos, sociais e ambientais.

5.4.1 Caracterização no Estado fresco

Na TABELA 21 estão apresentados os ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco. Primeiramente, o índice de consistência foi empregado como parâmetro de ajuste da quantidade de água das formulações de argamassas tradicionais. A densidade aparente no estado fresco e o teor de ar incorporado são características básicas da mistura no estado fresco e, portanto, foram determinadas para embasar análises do desempenho no estado endurecido.

TABELA 21 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

Ensaio	Norma
Índice de consistência	NBR 13276:2016
Densidade de massa aparente	NBR 13278:2005
Teor de ar incorporado	NBR 13278:2005

FONTE: O autor (2020).

5.4.2 Caracterização no Estado endurecido

Na TABELA 22 estão apresentados os ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido. Todos os ensaios de caracterização foram realizados aos 28 dias de idade dos corpos de prova. A seleção destes ensaios teve como base os requisitos de desempenho contidos nas normas nacionais NBR 13281 (ABNT, 2005) e NBR 16648 (ABNT, 2018). Seguiu-se, basicamente, o prescrito pela primeira norma, que trata – como um todo – das argamassas de revestimento. Além disso, quanto à segunda norma mencionada, selecionou-se os ensaios que permitem a avaliação quanto à suscetibilidade à fissuração. Ademais, incluiu-se outros ensaios complementares, viabilizando uma avaliação mais

consistente quanto ao desempenho das formulações e, também, traçar relações com a avaliação da durabilidade das mesmas.

O procedimento de cura dos corpos de prova foi realizado ao ar, em ambiente de laboratório, com temperatura controlada a $(23\pm3)^{\circ}\text{C}$.

Ressalva-se que a caracterização ora abordada é referente à condição padrão dos corpos de prova aos 28 dias de idade, sem aplicação da ação de calor e choque térmico. Por outro lado, posteriormente, alguns destes ensaios também foram realizados para fins de avaliação de durabilidade, em etapa descrita adiante (item 5.4.2.7), após as argamassas serem submetidas às ciclagens propostas para ação do calor e choque térmico. Desse modo, também foi possível avaliar o efeito da ciclagem sobre as propriedades de cada formulação.

TABELA 22 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO NO ESTADO ENDURECIDO

Ensaio	Norma	Quantidade de corpos de prova por formulação	Dimensões da amostra (cm)
Densidade de massa aparente	NBR 13280:2005	4	4x4x16
Absorção de água por imersão e índice de vazios	NBR 9.778:2009	3	
Absorção por capilaridade	NBR 15259:2005	4	
Resistência à tração na flexão	NBR 13.279:2005	3	
Resistência à compressão axial	NBR 13.279:2005	6	
Módulo de elasticidade dinâmico	NBR 15630:2008	3	
Resistividade elétrica superficial	UNE 83988-2:2014	4	
Variação dimensional	NBR 15261:2005	6	2,5x2,5x28,5
Dilatação térmica	Método proposto pelo autor (2020)	3	

FONTE: O autor (2020).

A realização dos ensaios descritos seguiu os procedimentos recomendados pelas normas referenciais, salvo algumas adaptações mencionadas adiante.

Além disso, com os dados obtidos para resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade dinâmico e variação dimensional, foi possível avaliar a suscetibilidade à fissuração das formulações de argamassas de revestimento.

5.4.2.1 Absorção de água por imersão e índice de vazios

Realizou-se ainda o ensaio de absorção de água por imersão e índice de vazios, conforme procedimento contido na NBR 9.779 (ABNT, 2009). Todavia, destaca-se que não foi realizada a etapa de fervura das amostras. Este procedimento foi realizado para 4 (quatro) corpos de prova por formulação de argamassa aos 28 dias de idade, a contar da moldagem.

5.4.2.2 Absorção por capilaridade

Para o ensaio de absorção por capilaridade, vide NBR 15259 (ABNT, 2005), ressalva-se que não foi aplicado lixamento da superfície das amostras, objetivando não interferir no desgaste superficial decorrente da ciclagem, assumido como hipótese. Além disso, as amostras foram posicionadas no aparato com a face de dimensão $4 \times 16 \text{ cm}^2$ (64 cm^2) em contato com a água, conforme FIGURA 24. Para este procedimento, foram ensaiados 4 (quatro) corpos de prova por formulação de argamassa aos 28 dias de idade, a contar da moldagem. Ressalta-se que o procedimento de moldagem foi realizado com uso de desmoldante nas fôrmas dos corpos de prova.

FIGURA 24 – ESQUEMA DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE



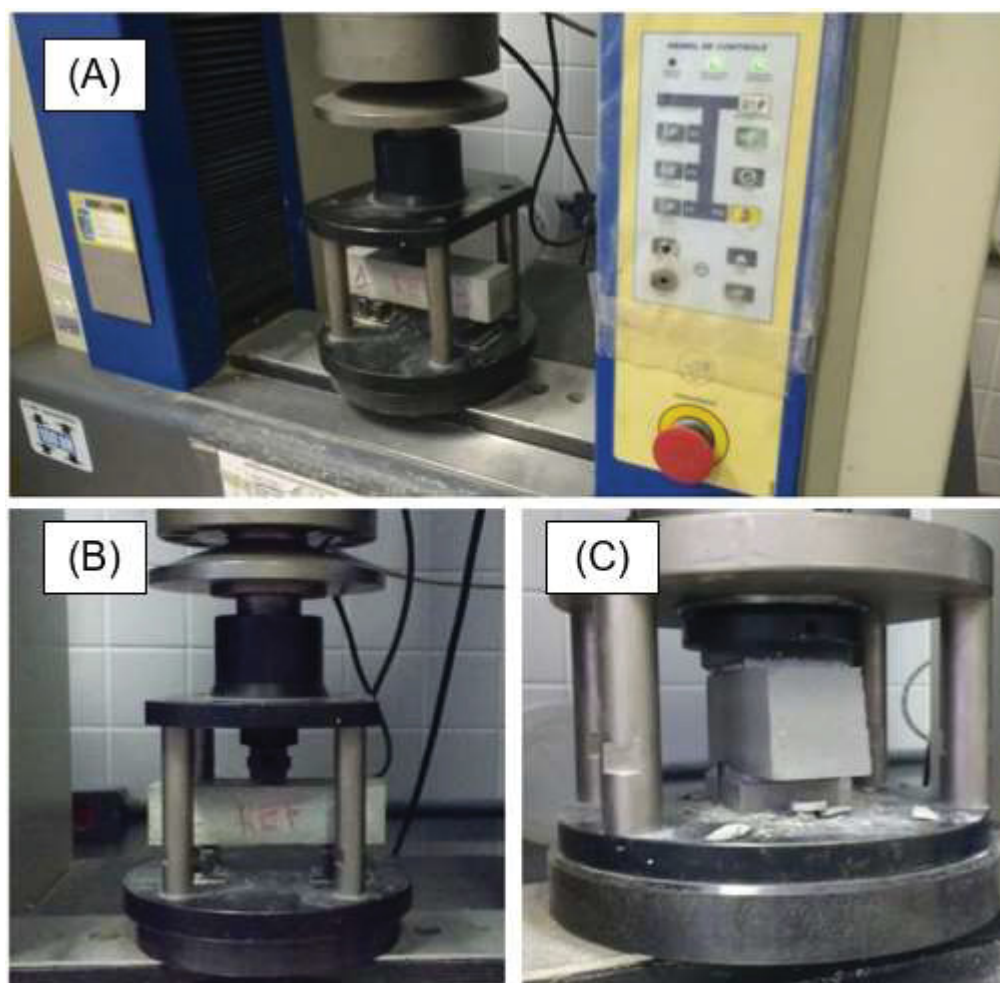
FONTE: O autor (2020).

5.4.2.3 Resistências mecânicas

A determinação da resistência à tração na flexão e da resistência à compressão axial seguiu os preceitos da NBR 13.279 (ABNT, 2005). Para tal, foram

empregados 3 corpos de prova por formulação, de modo que as metades restantes do ensaio de tração foram conduzidas ao ensaio de compressão, resultando em 6 (seis) corpos de prova para o segundo. A execução das rupturas foi realizada em prensa universal Emic®, com capacidade de carga de 100 kN, e encontra-se ilustrada em FIGURA 25.

FIGURA 25 – EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIAS MECÂNICAS EM PRENSA UNIVERSAL (A): TRAÇÃO NA FLEXÃO (B) E COMPRESSÃO AXIAL (C).



FONTE: O autor (2020).

5.4.2.4 Módulo de elasticidade dinâmico

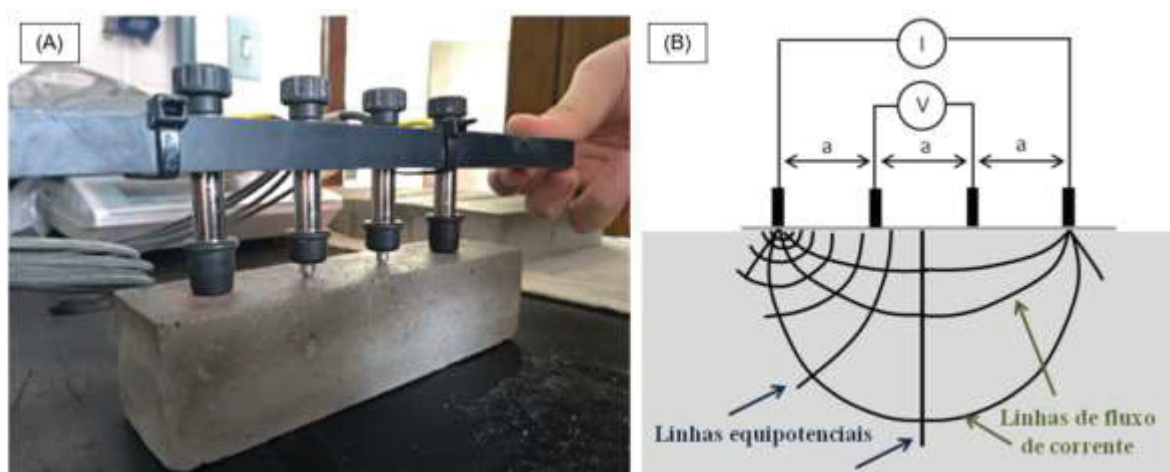
Para o ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico, através de propagação de onda ultrassônica, utilizou-se aparelho digital de ultrassom Proceq® Pundit Lab+, operando a uma frequência de 150 kHz com largura de pulso de 3,3 μ s, tensão de excitação e ganho automáticos. A norma de referência é a NBR

15630 (ABNT, 2008). Foram ensaiados 4 (quatro) corpos de prova ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) aos 28 dias de idade para cada formulação, para esta etapa de caracterização das argamassas de revestimento estudadas. Os corpos de prova foram ensaiados na condição de cura.

5.4.2.5 Resistividade elétrica superficial

A execução deste ensaio seguiu as diretrizes da norma espanhola UNE 83988-2 (AENOR, 2014). Foram, portanto, empregadas 4 (quatro) amostras prismáticas de argamassa de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, para aferição através do método dos quatro pontos, ou método de Wenner. Destaca-se que os corpos de prova foram ensaiados em condição saturada com superfície seca (SSS), de modo que foram previamente imersos em água por 72 horas para tal. Ademais, foi utilizado equipamento da marca *Proceq®*, modelo *Resipod*, com quatro eletrodos igualmente espaçados a 35 mm entre si. Ao ser posicionado sobre a superfície do corpo de prova, uma corrente elétrica é aplicada entre os dois eletrodos externos e a diferença de potencial resultante é medida pelos dois eletrodos internos, conforme ilustrado na FIGURA 26 (MEDEIROS-JUNIOR e LIMA, 2016). A correção necessária devido ao tamanho e formato dos corpos de prova foi aplicada conforme coeficiente previsto na norma UNE 83988-2 (AENOR, 2014), equivalente a 0,172.

FIGURA 26 – ESQUEMA DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA (A) E PRINCÍPIOS DE LEITURA (B)



FONTE: O autor (2020) e MEDEIROS-JUNIOR e LIMA (2016).

5.4.2.6 Variação dimensional

O ensaio de variação dimensional, usualmente empregado para aferição da retração por secagem de argamassas de revestimento, está prescrito na NBR 15261 (ABNT, 2005). Tal ensaio prevê a avaliação da variação por meio de corpos de prova (CP) prismáticos com dimensões de 2,5x2,5x28,5 cm, moldados com pinos metálicos que possibilita a fixação dos mesmos – já no estado endurecido – em um pórtico com relógio comparador.

Para a realização da leitura no aparelho comparador, faz-se necessária uma calibração prévia do mesmo por meio de uma barra padrão, de tal forma que – quando o CP esteja posicionado no equipamento – o relógio comparador apresente a diferença entre o corpo de prova e a barra de referência. A NBR 15261 (ABNT, 2005) ainda indica que sejam efetuadas leituras e pesagens nas idades de 1, 7 e 28 dias contadas da desforma, a qual deverá ser feita 48 horas após a moldagem – sendo que as leituras devem ser efetuadas para as quatro faces do CP, estando este sempre na mesma posição.

Contudo, é possível empregar algumas adaptações ao ensaio em questão, conforme executado por Lopes da Silva (2016) e Nenevê (2017). Dessa forma, os pontos do procedimento adaptado que diferem do modelo normativo estão descritos a seguir:

- moldagem de 6 CP's para cada formulação;
- desmoldagem e leitura inicial com 48 horas (2 dias) após a moldagem para as formulações: I-A; I-B; I-C; M-1; M-2;
- desmoldagem e leitura inicial com 168 horas (7 dias) após a moldagem para a formulação: S-C;
- armazenamento em câmara seca com controle parcial de umidade;
- leituras nas idades de 1, 7, 14, 21, 28 e 42 dias após a desmoldagem, objetivando obter uma melhor análise do fenômeno estudado.

Assim, o cálculo da variação dimensional, conforme a norma de referência, é determinado pela EQUAÇÃO 4.

$$\varepsilon_n = \frac{L_n - L_0}{0,25}$$

EQUAÇÃO 4

Onde:

ε_i : Variação dimensional na idade i (mm/m);

L_n : Leitura efetuada na idade n (mm);

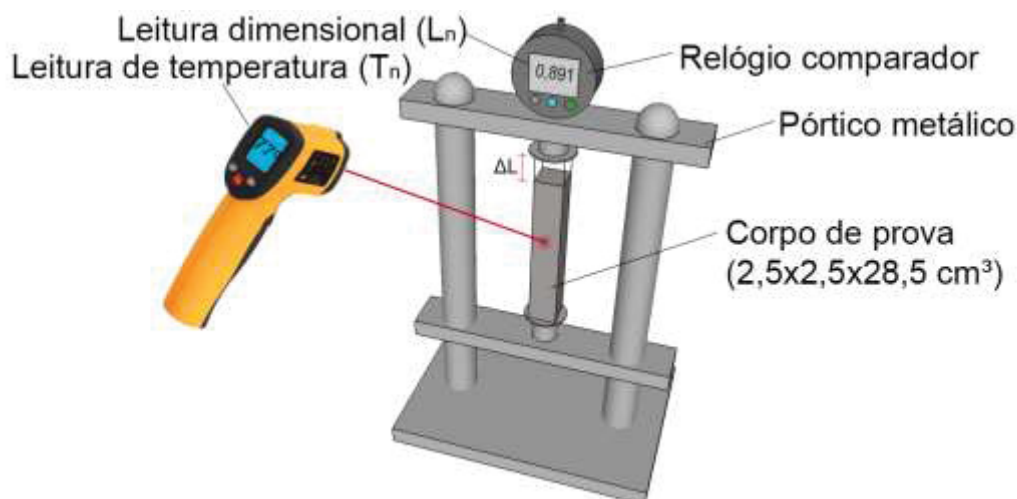
L_0 : Leitura inicial, logo após desforma (mm).

5.4.2.7 Dilatação térmica

Para a avaliação da dilatação térmica, na ausência de procedimento específico, tomou-se por base a NBR 12815 (ABNT, 2012) que possibilita a determinação do coeficiente de dilatação térmica linear para concretos no estado endurecido.

A faixa de temperatura compreendida por este procedimento varia de 4 a 38°C, não contemplando a totalidade do intervalo de temperatura prescrito pelo Anexo E da NBR 15575-4 (ABNT, 2013). Portanto, neste estudo, empregou-se a temperatura máxima de ciclagem de ação de calor da NBR 15575-4 (ABNT, 2013), equivalente à (80±3)°C, e temperatura mínima de (20±3)°C. Para tal, foram utilizados três corpos de prova de dimensão 2,5x2,5x28,5 cm³ – vide NBR 15261 (ABNT, 2005) por formulação. Assim, para a leitura de variação dimensional, empregou-se pórtilho com relógio comparador. O esquema do ensaio realizado está ilustrado na FIGURA 27. Foram empregados três corpos de prova com pinos metálicos por formulação de estudo. Para tanto, seguiu-se basicamente alguns preceitos da norma NBR 12815 (ABNT, 2012), que trata de concretos, a citar:

- Corpos de prova devem possuir dimensão mínima de 3 (três) vezes a dimensão máxima característica do agregado empregado na formulação;
- Utilizar ao menos 2 (dois) corpos de prova por ensaio, com idade mínima de 3 (três) dias (foram aplicados 3 corpos de prova por formulação).

FIGURA 27 – ILUSTRAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE DETERMINAÇÃO DE α 

FONTE: O autor (2020).

A etapa de aquecimento foi realizada com uso de estufa (ajustada à temperatura de 80°C) – na qual as amostras permaneceram por 48 h (tal como prescrito pela norma de referência). Os corpos de prova foram, então, conduzidos, imediatamente após a sua retirada da estufa, para leitura da variação dimensional (pórtico com relógio comparador) e temperatura (por meio de um termômetro digital infravermelho a laser), a fim de aferir a temperatura superficial do corpo de prova (no ponto central da face externa). Este procedimento foi realizado em ambiente de laboratório com temperatura controlada a (23±3)°C. Após esta primeira leitura (instante zero), empregaram-se na sequência mais oito instantes de leituras ao longo do tempo, vide apresentado em TABELA 23. Para estas demais leituras, os corpos de prova permaneceram em ambiente de laboratório à (23±3)°C, fora da estufa, de modo que fossem resfriando ao longo do tempo, ou seja, as leituras registram as quedas de temperatura ao longo de 30 minutos.

TABELA 23 – LEITURAS AO LONGO DO ENSAIO DE VERIFICAÇÃO DA DILATAÇÃO TÉRMICA

Instante (min)	0	1	2	3	4	5	10	20	30
Leitura de temperatura (°C) [T_n]	T_0	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_{10}	T_{20}	T_{30}
Leitura dimensional (mm) [L_n]	L_0	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_{10}	L_{20}	L_{30}

FONTE: O autor (2020).

A justificativa para a realização de nove leituras é embasada na possibilidade de verificar de forma mais completa, a variação dimensional para diferentes faixas de temperatura. O tempo de 30 minutos é fixado com respaldo no item 4.5.2, que demonstrou que este tempo é suficiente para estabilização da temperatura das amostras.

Calculou-se, primeiramente, a deformação específica (equivalente à dilatação térmica específica) $[\varepsilon_n]$, conforme EQUAÇÃO 5. Assim, tomou-se a dimensão $[L_{30}]$ acrescida do comprimento da barra padrão de ensaio (285 mm) como comprimento inicial de cada amostra em relação às demais dimensões $[L_n]$. Analogamente, determinou-se a variação de temperatura $[\Delta T_n]$ para cada um destes instantes $[T_n]$ em relação à temperatura $[T_{30}]$, conforme EQUAÇÃO 6.

$$\varepsilon_n = \frac{L_n - L_{30}}{L_{30} + 285} \quad \text{EQUAÇÃO 5}$$

$$\Delta T_n = T_n - T_{30} \quad \text{EQUAÇÃO 6}$$

Sequencialmente, estimaram-se os coeficientes de dilatação térmica (α), conforme EQUAÇÃO 7. Consideraram-se: a dimensão do instante zero $[L_0]$; a dimensão final $[L_{30}]$ somada ao comprimento da barra padrão (285 mm); a temperatura do instante zero $[T_0]$; e a temperatura final $[T_{30}]$ de ensaio para cada formulação. Basicamente, a equação equivale à divisão da deformação específica pela variação de temperatura entre os instantes final e inicial de leituras.

$$\alpha = \frac{L_0 - L_{30}}{(L_{30} + 285) \cdot (T_0 - T_{30})} = \frac{\varepsilon_0}{\Delta T_0} \quad \text{EQUAÇÃO 7}$$

Onde:

α : coeficiente de dilatação linear ($^{\circ}\text{C}^{-1}$);

L_0 : leitura de variação dimensional no instante zero (mm);

L_{30} : leitura de variação dimensional no instante 30 (mm);

T_0 : leitura de temperatura no instante zero ($^{\circ}\text{C}$);

T_{30} : leitura de temperatura no instante 30 ($^{\circ}\text{C}$).

O APÊNDICE 2 apresenta um documento orientativo para execução deste ensaio proposto. Explica-se ainda que a obtenção deste parâmetro permite traçar comportamentos relacionados às solicitações térmicas, as quais representam significativa importância para este estudo, tendo em vista a aplicação de ensaio de choque térmico.

5.4.3 Efeito da ação de calor e choque térmico

Com intuito de avaliar o desempenho quanto à durabilidade (com respaldo no requisito de desempenho frente à ação de calor e choque térmico preconizado pela norma de desempenho) e, concomitantemente, verificar o efeito da ciclagem sobre as propriedades estudadas (analisando a sensibilidade do método), as argamassas foram também ensaiadas com idade de 42 dias após a moldagem, que equivale ao tempo suficiente para que seja aplicada a ciclagem (iniciando aos 28 dias). Para esta etapa de estudo, as argamassas foram subdivididas em duas condições de exposição: com ou sem ciclagem; ou seja, argamassas que foram submetidas ao procedimento proposto e argamassas que não sofreram esta exposição. Portanto, foram moldados paralelamente, além das amostras submetidas à ciclagem, corpos de prova não conduzidos ao procedimento de ciclagem – para fins de comparação das propriedades. Tais amostras permaneceram acondicionadas com condições climáticas idênticas às aplicadas para a transição de ciclos, em ambiente controlado de laboratório.

Após a realização das etapas anteriormente descritas, as amostras estudadas (com e sem ciclagem) foram conduzidas aos ensaios elencados na TABELA 24, com intuito de verificar a alteração das propriedades decorrentes da ciclagem. Destaca-se que a avaliação quanto à suscetibilidade à fissuração (critérios elencados em TABELA 6) foi empregada para embasar tal análise.

TABELA 24 – ENSAIOS PARA VERIFICAÇÃO DO EFEITO DA CICLAGEM DE AÇÃO DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO AOS 42 DIAS DE IDADE

Ensaio	Norma	CP por formulação*	Dimensões dos CP (cm)
Densidade de massa aparente	NBR 13280:2005	4	4x4x16
Absorção por capilaridade	NBR 15259:2005	4	
Absorção de água por imersão e índice de vazios	NBR 9.778:2009	4	
Resistência à tração na flexão	NBR 13.279:2005	3	
Resistência à compressão axial	NBR 13.279:2005	6	
Módulo de elasticidade dinâmico	NBR 15630:2008	4	
Resistividade elétrica superficial	UNE 83988-2:2014	4	
Variação dimensional	NBR 15261:2005	6	2,5x2,5x28,5

*O valor apresentado diz respeito a quantidade ensaiada para cada tipo de exposição (com ou sem ciclagem).

FONTE: O autor (2020).

Finalmente, também foi possível estimar a tensão térmica de tração máxima que solicitou as argamassas de revestimento durante a ação de calor e choque térmico, através do modelo de Timoshenko e Goodier (1968), vide EQUAÇÃO 2. Ressalva-se que, conforme instrução da NBR 15630 (ABNT, 2009), o coeficiente de Poisson foi considerado equivalente a 0,2 para todas as formulações. Deste modo, comparou-se a tensão solicitante estimada com a resistência à tração na flexão característica aos 28 dias de idade para inferir acerca da ocorrência de fissuração nas amostras.

5.4.4 Análise estatística

Outrossim, salienta-se que – para os resultados obtidos para os ensaios empregados neste programa experimental – foram aplicados testes de validação estatística aos dados. Primeiramente, aplicaram-se testes de exclusão de dados espúrios (*outliers*), através do método de Grubbs (1969).

Finalmente, empregaram-se análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey à 5% de significância, a fim de verificar a significância dos diversos resultados, fomentando as conclusões e discussões discurridas.

A análise estatística encontra-se apresentada em APÊNDICE 4, juntamente com demais resultados gerais.

5.4.5 Estudo de viabilidade

A despeito das avaliações explanadas nos subitens anteriores, voltadas às formulações de argamassas empregadas na presente pesquisa, realizou-se este estudo de viabilidade do método proposto em item 4.5.3. Tal procedimento englobou aspectos de ordem técnica, econômica, social e ambiental. Importante repisar que o método proposto é complementar (não alternativo) ao procedimento contido no Anexo E da NBR 15.575-4 (ABNT, 2013), e visa avaliar o componente “argamassa de revestimento” isoladamente do SVVE.

A verificação da viabilidade quanto à questão técnica irá abordar também os conceitos de reprodutibilidade e repetitividade. Considera-se, portanto, para efeito desta análise, que:

- Repetitividade remete à variação das medidas obtidas por um único indicador (propriedade, neste caso), utilizando o mesmo equipamento de medição e método, ao medir repetidas vezes uma mesma grandeza. Se refere, por conseguinte, à variabilidade característica do método, e decorre da sua capacidade de fornecer leituras repetidas muito próximas, sob as mesmas condições (IVM, 2008; PEDOTT; FOGLIATTO, 2013). Assim, a repetitividade do método poderá ser verificada através da repetição de dados decorrentes de diferentes corpos de prova das mesmas argamassas submetidos às mesmas condições de exposição e aferição de dados. Para tal, fez-se uso dos resultados obtidos através teste de exclusão de dados espúrios (*outliers*) de Grubbs (1969), vide indicado anteriormente em item 5.4.4, verificando a convergência dos dados.
- Reprodutibilidade remete à variação das médias obtidas por diferentes indicadores (propriedades) utilizando o mesmo equipamento de medição para medir repetidamente uma mesma grandeza. Portanto, se refere à capacidade de um método apresentar resultados condizentes às alterações empregadas (IVM, 2008). No caso desta pesquisa, por exemplo, a reprodutibilidade poderá ser comprovada através da verificação da variação de resultados decorrente de distintos tipos de argamassa de revestimento ensaiadas. Para tal, recorreu-se à análise

estatística decorrente da ANOVA (conforme item 5.4.4), verificando a existência de significância estatística (sensibilidade) para diferentes formulações de argamassa de revestimento (industrializadas e tradicionais).

Finalmente, sob a ótica econômica, parte desta avaliação de viabilidade está respaldada por um estudo de custos demandados por ambos os métodos de ensaio. Assim, é possível estimar o impacto financeiro decorrente da execução do procedimento complementar proposto em relação ao método de referência. Primeiramente, para determinação de valores que compõem toda a execução do método base (NBR 15575-4), foram realizadas tomadas de preço com 4 (quatro) diferentes laboratórios que realizam o referido procedimento de ensaio.

Já para estimativa de custos com material e mão de obra, despendidos com execução e descarte dos painéis de parede (corpos de prova), foi elaborado um orçamento, tendo por referência a base de preços do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) da Caixa Econômica Federal, com data-base de JAN/2020, e também da Companhia Estadual de Habitação e Obras Públicas de Sergipe (CEHOP), através do sistema Orçamento de Obras de Sergipe (ORSE), com data-base de SET/2019.

Por outro lado, para levantamento de custos decorrentes do método proposto, empregou-se, além das mesmas bases de referência, cotações de preço de mercado, com datas equivalentes entre si. Considerou-se o custo decorrente de: material para execução dos corpos de prova; consumo de água para resfriamento; aquisição de insumos para desenvolvimento do reservatório (vide projeto disponível em Anexo A do APÊNDICE 1); e aquisição do termômetro laser infravermelho para aferição de temperatura.

O APÊNDICE 3 contém o orçamento completo, com descrição dos itens, quantitativos, custos unitários e totais para ambos os procedimentos.

De forma análoga ao aspecto econômico, sob a ótica ecológica, estimou-se o volume de resíduos resultante de ambos os procedimentos, com intuito de verificar o impacto decorrente da execução do procedimento complementar proposto em relação ao procedimento de referência, prescrito no Anexo E da NBR 15.575-4 (ABNT, 2013)

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este item apresenta os resultados obtidos para as caracterizações no estado fresco e no estado endurecido para as formulações de argamassas estudadas, com respectiva verificação de comportamento frente à ação de calor e choque térmico e demais discussões decorrentes.

5.5.1 Caracterização no estado fresco

Os resultados de caracterização das formulações de argamassa de revestimento no estado fresco são apresentados na TABELA 25.

TABELA 25 – CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

Formulação	Índice de consistência (mm)	Densidade de massa (kg/m³)	Teor de ar incorporado (%)
I-A	203	1,34	40
I-B	211	1,50	33
I-C	225	1,37	37
M-1	259	2,79	12
M-2	259	2,76	12
S-C	259	2,65	18

FONTE: O autor (2020).

Observa-se, inicialmente, que as argamassas industrializadas apresentaram índice de consistência inferior ao das argamassas tradicionais. Além disso, os resultados de densidade de massa e teor de ar incorporado demonstram que a caracterização no estado fresco é distinta para estes dois grupos, vez que as industrializadas possuem maior teor de ar incorporado e menor densidade de massa. Conquanto, tais dados são condizentes entre si, haja vista que as argamassas industrializadas possuem aditivos químicos em sua composição (dentre eles incorporadores de ar), que explicam tais resultados obtidos. Além disso, conforme observado por Nakakura e Cincotto (2001), o procedimento de mistura normatizado nacionalmente, atualmente prescrito pela NBR 16541 (ABNT, 2016),

conduz a valores de ar incorporado¹ da ordem de 30% a 40% para argamassas industrializadas.

Outrossim, analisando-se os resultados do grupo das argamassas tradicionais, vê-se que o aumento da quantidade de cal na mistura (que ocorre na ordem: M-1, M-2, S-C) implicou em redução da densidade das formulações. Tal fato é justificado pela menor densidade da cal em relação aos demais insumos, além de esta ter exigido maior quantidade de água (maior relação a/ms) para atingir a o índice de consistência especificado em 260 ± 10 mm, consoante resultados observados por Quarcioni e Cincotto (2005).

5.5.2 Caracterização no estado endurecido e efeito da ação de calor e choque térmico

Este item apresenta os resultados obtidos para a caracterização no estado endurecido (28 dias de idade), avaliação de desempenho e efeito da ação de calor e choque térmico (42 dias de idade) das formulações estudadas. Cabe ressaltar, inicialmente, que a análise ora apresentada foi realizada de forma relativa (não absoluta). Ou seja, os dados foram avaliados com enfoque na variação ocorrida para as diferentes idades e condições de exposição, sem entrar no mérito da magnitude dos resultados de cada argamassa. Tal fato decorre do objetivo do presente estudo, aliado às diferentes variáveis associadas que impediriam embasar a referida discussão absoluta.

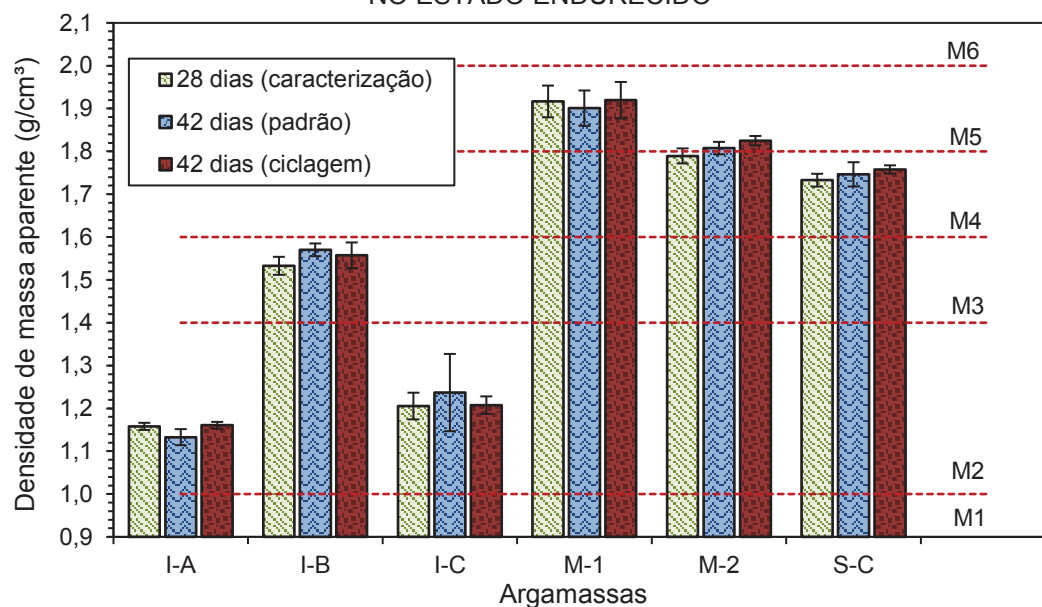
5.5.2.1 Densidade de massa aparente

Os resultados obtidos para cada uma das formulações de estudo quanto à densidade de massa aparente no estado endurecido encontram-se retratados na FIGURA 28. O gráfico encontra-se dividido em 3 (três) idades: caracterização aos 28 dias após moldagem; caracterização aos 42 dias após moldagem (sem processo de ciclagem); e caracterização aos 42 dias após moldagem (após serem submetidas

¹ Termo adotado pela referida norma para representar a totalidade de ar na mistura, englobando o ar incorporado devido aos aditivos químicos e, também, o ar aprisionado decorrente do processo de mistura efetivamente

ao processo de ciclagem proposto). O gráfico apresenta também os limites de classes de desempenho conforme requisitos da NBR 13281 (ABNT, 2005), em linhas tracejadas vermelhas.

FIGURA 28 – DENSIDADE DE MASSA APARENTE DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO NO ESTADO ENDURECIDO



FONTE: O autor (2020).

De antemão, traçando correlação com o estado fresco, nota-se que os resultados de densidade são condizentes entre si, de modo que a densidade do grupo das argamassas industrializadas possui valores médios mais baixos que as argamassas tradicionais. Portanto, reiteram-se as considerações anteriormente explanadas acerca da correlação de algumas propriedades do estado fresco e endurecido. Desta forma, observa-se clara distinção de densidade entre os grupos de argamassas industrializadas e tradicionais, possivelmente explicada pelos diferentes insumos utilizados, especialmente pelos aditivos incorporadores de ar.

Comparando os resultados de 42 dias (com e sem ciclagem), constata-se que a ciclagem não interferiu nesta propriedade, ao menos para o nível de sensibilidade do ensaio empregado. Tal observação, no entanto, se mostra justificável, haja vista que após serem submetidas à ciclagem, as argamassas retornaram à condição de exposição padrão das demais (ambiente controlado de laboratório), equiparando parâmetros como, por exemplo, a umidade da amostra que poderia ter sido alterada ao longo do procedimento de ação de calor e choque

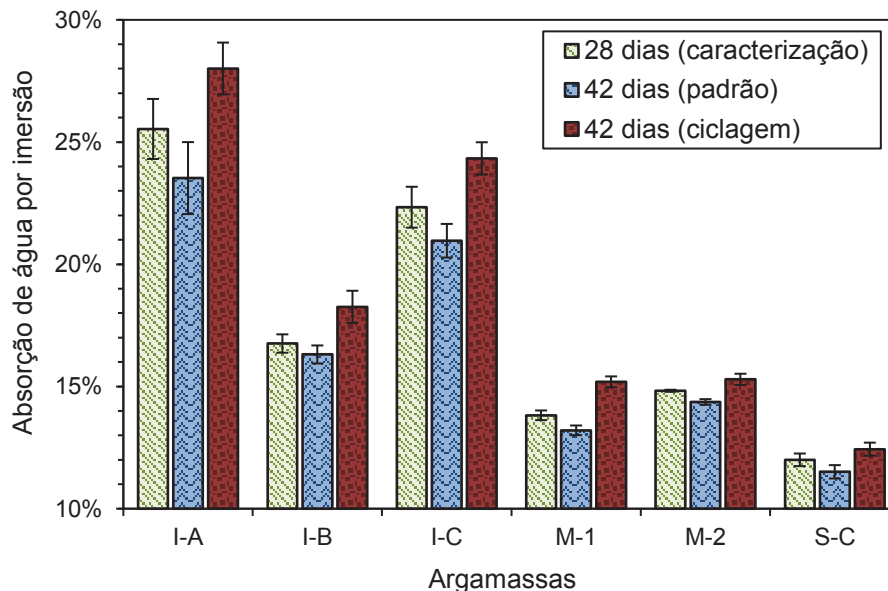
térmico. Observa-se, portanto, que a densidade mostrou tendência de constância ao longo do tempo, para todas as argamassas estudadas, mesmo após aplicação do procedimento de ciclagem. Tal comportamento é reforçado ao recorrer-se às barras de erro padrão e, igualmente, ao teste estatístico de Tukey à 5% de significância.

Ao verificar os limites da NBR 13281 (ABNT, 2005) para requisitos de densidade de massa aparente no estado endurecido, nota-se que as argamassas industrializadas, comercializadas para a mesma aplicação, possuem classificações distintas, tal que I-A e I-C são classe M2 e I-B é classe M3.

5.5.2.2 Absorção por imersão e índice de vazios

Por meio do procedimento prescrito pela NBR 9.778 (ABNT, 2009), determinou-se a absorção de água e o índice de vazios das argamassas de revestimento. Inicialmente, a FIGURA 29 ilustra os resultados obtidos para absorção de água por imersão.

FIGURA 29 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTOS



FONTE: O autor (2020).

Nota-se um comportamento padrão para todas as formulações. Inicialmente, a absorção reduz de valor entre 28 e 42 dias (sem ciclagem). Tal comportamento é justificado pela evolução das reações de hidratação do cimento e

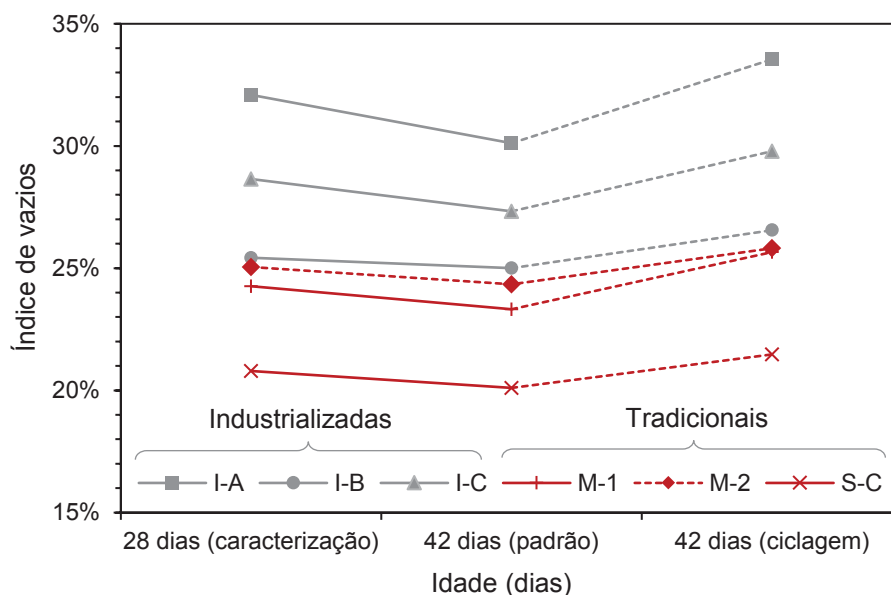
recarbonatação dos óxidos da cal, que tendem a reduzir os vazios da matriz aglomerante, reduzindo a interconexão dos poros capilares, e, conseqüentemente, a absorção de água resultante. Todavia, uma vez que tal fenômeno ocorre em ordem microestrutural, entende-se que não foi possível identificar sua evolução de maneira significativa pelo ensaio de densidade de massa aparente no estado endurecido, dentro do nível de sensibilidade do ensaio.

Sequencialmente, observa-se que o valor de absorção é maior para as amostras submetidas à ciclagem em comparação às amostras de mesma idade (42 dias) sem ciclagem de ação de calor e choque térmico. Infere-se, inicialmente, com respaldo na análise variância (ANOVA), que o diferente tipo de tratamento (neste caso: 42 dias de idade com ou sem ciclagem) possui influência estatisticamente significativa sobre o resultado de absorção de água. Ou seja, o procedimento de ciclagem proposto de fato solicitou a amostra e interferiu no desempenho quanto à absorção por imersão.

Tais resultados evidenciam a possível ocorrência de fissuras nos corpos de provas submetidos à ciclagem de ação de calor e choque térmico ora proposta. O comportamento observado é corroborado por Gallé (2001), que constatou que temperaturas de secagem entre 60 °C e 105 °C resultam em aumento da porosidade capilar, decorrente de tensões térmicas, desidratação inicial de hidratos do cimento e geração de microfissuras decorrentes do estresse hidrotérmico interno. Assim, de fato, verifica-se tendência semelhante na avaliação do índice de vazios e, igualmente, da absorção por capilaridade. Além disso, os ensaios de RES e Módulo de elasticidade dinâmico, adiante apresentados, também respaldam a presente discussão.

Apresentam-se na FIGURA 30 os valores de índice de vazios das formulações de argamassas industrializadas e tradicionais, destacando a distinção dos dois grupos.

FIGURA 30 – ÍNDICE DE VAZIOS DAS ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS (CINZA) E TRADICIONAIS (VERMELHO)

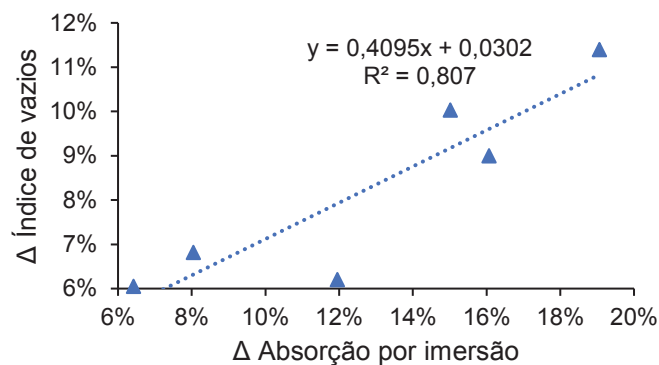


FONTE: O autor (2020).

Conforme esperado, evidencia-se novamente o comportamento de discreta redução dos valores de índice de vazios entre 28 dias e 42 dias sem ciclagem, vide observado para absorção por imersão, seguido de um aumento para a condição de 42 dias com ciclagem. Além disso, nota-se uma distinção entre as caracterizações obtidas para cada grupo de argamassa. Os valores de absorção de água por imersão e índice de vazios são superiores para as argamassas industrializadas (variando de 28,7% a 32,1% aos 28 dias) em relação às tradicionais (20,8% a 25,0%).

Dessa forma, em termos de avaliação do desempenho frente à ação de calor e choque térmico, constatou-se um aumento da absorção de água por imersão e de índice de vazios, possivelmente devido a: tensões térmicas; desidratação inicial de hidratos do cimento; e geração de microfissuras decorrentes do estresse hidrotérmico interno (GALLÉ, 2001). Além disso, as variações percentuais entre 42 dias sem e com ciclagem mostraram-se proporcionais para as duas propriedades aqui discutidas, conforme apresentado na FIGURA 31. Evidenciando, novamente, o efeito decorrente do choque térmico.

FIGURA 31 – CORRELAÇÃO DAS VARIAÇÕES PERCENTUAIS DE ÍNDICE DE VAZIOS E ABSORÇÃO POR IMERSÃO DECORRENTES DA CICLAGEM DAS ARGAMASSAS



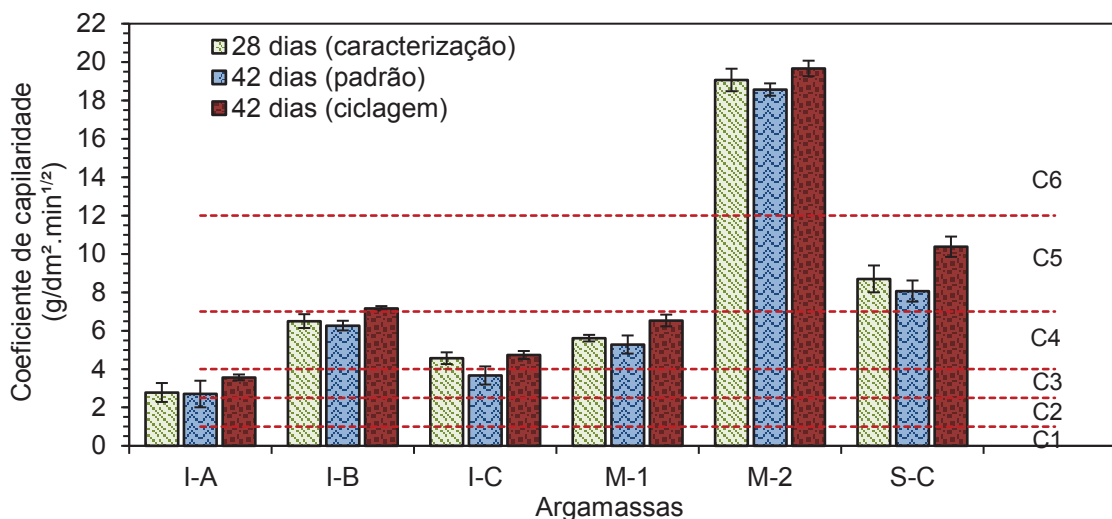
FONTE: O autor (2020).

5.5.2.3 Absorção por capilaridade

Os resultados de absorção por capilaridade, obtidos conforme NBR 15259 (ABNT, 2005) e adaptações anteriormente explanadas, estão demonstrados na FIGURA 32, com os valores médios dos coeficientes de capilaridade e respectivos desvios padrões. O referido gráfico ilustra os limites normativos para cada classe (C1 a C6) de desempenho, conforme requisitos da NBR 13281 (ABNT, 2005), em forma de linhas tracejadas vermelhas.

Frisa-se que as discussões doravante explanadas abordam tanto os termos “coeficiente de capilaridade” quanto “absorção por capilaridade”, vez que refletem o mesmo comportamento (determinados dentro do mesmo procedimento de ensaio), embora somente estejam apresentados os resultados do referido coeficiente – haja vista que este é o parâmetro adotado como requisito de desempenho pela NBR 13281 (ABNT, 2005).

FIGURA 32 – COEFICIENTE DE CAPILARIDADE E CLASSES DE DESEMPENHO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO



FONTE: O autor (2020).

Evidencia-se novamente o efeito do choque térmico sobre o desempenho das argamassas de revestimento, tanto para as industrializadas quanto para as tradicionais. Neste caso, entende-se que a ciclagem possivelmente resultou, através das solicitações térmicas, em maior conectividade dos poros capilares, propiciando uma maior absorção capilar e, conseqüentemente, maior coeficiente de capilaridade.

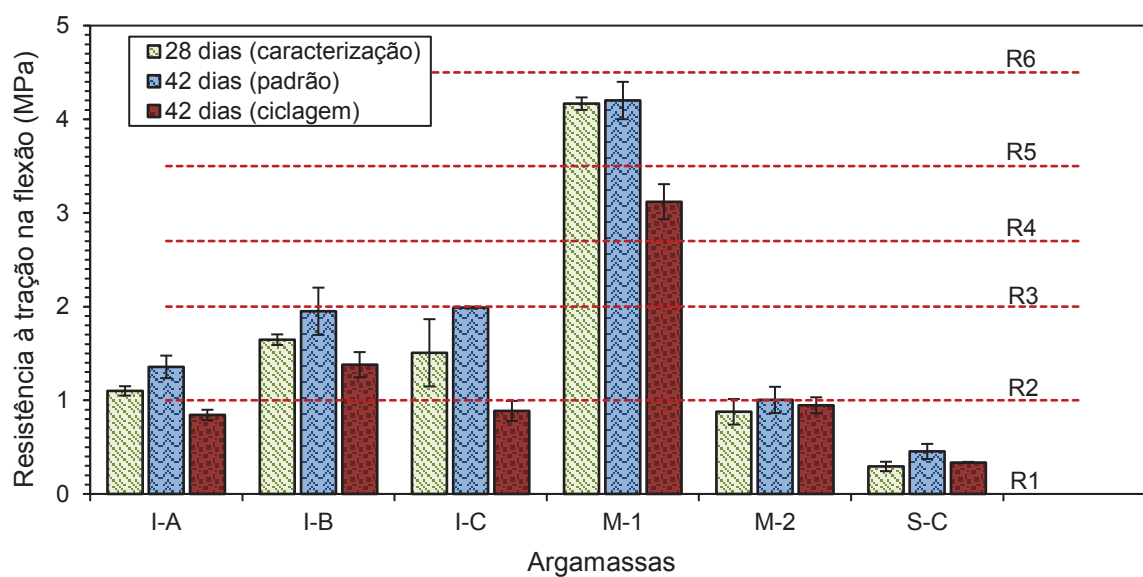
Ao avaliar os requisitos propostos pela NBR 13281 (ABNT, 2005), nota-se que existem diferentes classificações para as argamassas de revestimento em questão. Verifica-se ainda que, embora a ciclagem tenha afetado os resultados com significância estatística, as argamassas mantiveram a mesma classificação pelos critérios da NBR 13281 (ABNT, 2005), exceto pela I-B, que mudou da classe C4 para a C5 em decorrência do efeito da ciclagem.

Ao atentar-se aos dois grupos de forma isolada, nota-se que as industrializadas tenderam a resultar em médias de absorções capilares menores que as tradicionais, à exceção da argamassa M-1 que se enquadrrou na mesma classe de desempenho (C4) das argamassas I-B e I-C. Esta observação é possivelmente explicada pelo fato de que as argamassas industrializadas, embora sejam mais porosas por conta dos aditivos incorporadores de ar, possuam rede de poros menos conectados e com diâmetros capilares maiores que as tradicionais – o que de fato se espera do efeito proporcionado pelo aditivo químico mencionado.

5.5.2.4 Resistências mecânicas

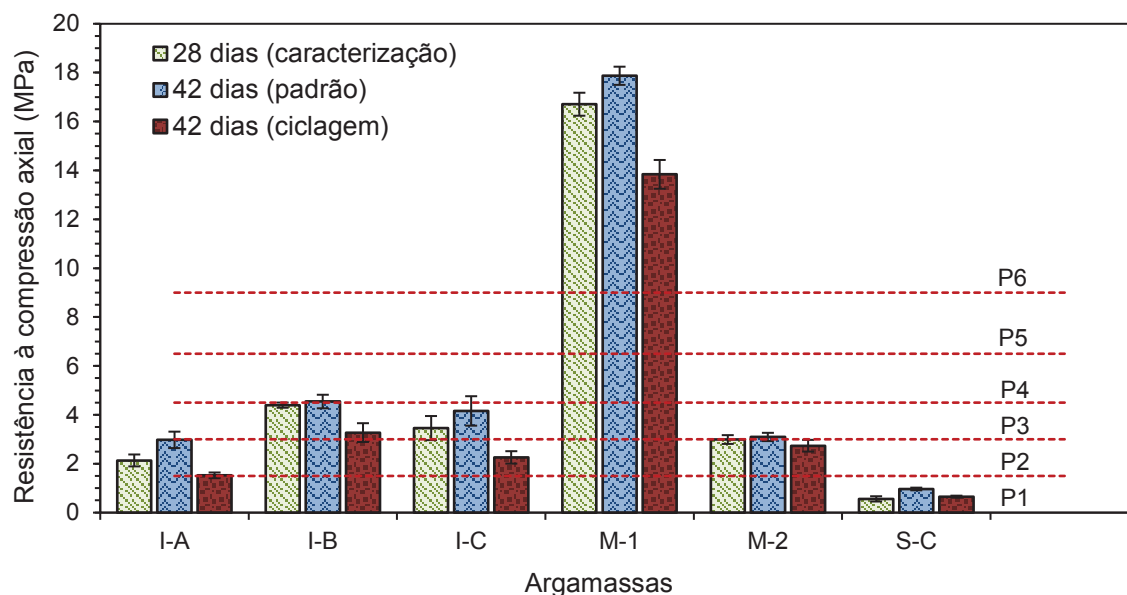
Neste subitem são apresentados os resultados de resistência à tração na flexão (FIGURA 33) e resistência à compressão axial (FIGURA 34), para as argamassas de revestimento nas idades de 28 e 42 dias (com e sem ciclagem). Os gráficos em questão indicam ainda, por meio de linhas tracejadas vermelhas, as diferentes classes de desempenho preconizadas pela NBR 13281 (ABNT, 2005).

FIGURA 33 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E CLASSES DE DESEMPENHO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 34 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E CLASSES DE DESEMPENHO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO



FONTE: O autor (2020).

As argamassas de revestimento apresentaram um aumento das resistências mecânicas de 28 dias de idade para 42 dias sem ciclagem, conforme esperado, possivelmente em virtude da evolução das reações de hidratação do cimento e recarbonatação dos óxidos da cal. Ademais, tal constatação é corroborada pelos resultados de absorção de água por imersão e índice de vazios anteriormente explanados, onde constatou-se redução de valores nestes parâmetros, provavelmente pelas mesmas razões ora discutidas.

Constata-se, por outro lado, uma redução de valores médios de resistências mecânicas de 42 sem ciclagem para 42 dias com ciclagem, evidenciando o efeito da ciclagem sobre o desempenho das argamassas. Ressalva-se, contudo, que os resultados da formulação M-2 não apresentaram, entre si, variação considerada estatisticamente significativa (conforme teste de Tukey – APÊNDICE 4), tal que podem ser considerados equivalentes para as três condições, embora se observe redução dos valores médios em decorrência ação de calor e choque térmico.

Reforçam-se, portanto, as discussões acerca da degradação imposta às argamassas pela ciclagem, indicando que o efeito do método proposto foi suficientemente sensível para alterar algumas propriedades analisadas. Provavelmente a fissuração decorrente do choque térmico aumentou o índice de vazios e absorção das argamassas e, por outro lado, reduziu as resistências

mecânicas. Além disso, tal discussão é respaldada pelos resultados de RES e Módulo de elasticidade dinâmico (propagação de onda de ultrassom), que igualmente indicam ocorrência de fissuração e degradação das amostras, conforme serão apresentados nos itens subsequentes.

A TABELA 26 representa a variação percentual de resistências mecânicas (degradação) decorrentes da ciclagem. Para as argamassas industrializadas, a argamassa I-C foi a mais afetada em termos de resistência à tração na flexão, enquanto a I-A sofreu maior perda percentual no que tange à resistência à compressão axial. Além disso, comparando-as com as argamassas tradicionais, vê-se que a perda percentual média de resistência mecânica das industrializadas foi superior, ou seja, sofreram maior degradação.

TABELA 26 – DEGRADAÇÃO (VARIAÇÃO PERCENTUAL) DAS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO AOS 42 DIAS DE IDADE DECORRENTE DO CHOQUE TÉRMICO

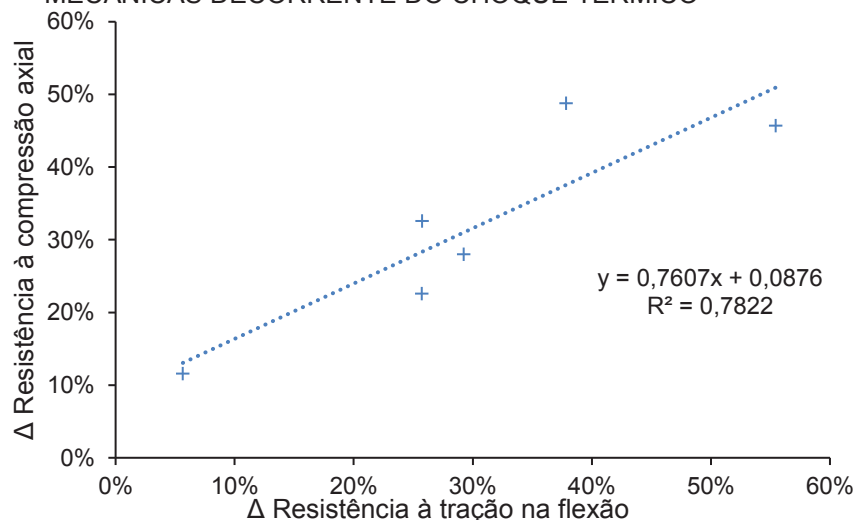
Argamassa	Degradação (variação percentual)	
	Resistência à tração na flexão	Resistência à compressão axial
I-A	37,8%	48,8%
I-B	29,2%	28,0%
I-C	55,4%	45,7%
M-1	25,7%	22,6%
M-2	5,6%	11,6%
S-C	25,7%	32,6%

FONTE: O autor (2020).

Portanto, em suma, as todas as formulações perderam resistência mecânica em decorrência da ação de calor e choque térmico. Reitera-se, todavia, que a variação observada em M-2, comparando os resultados com e sem ciclagem, não foi considerada estatisticamente significativa pelo teste de Tukey. As formulações I-A, I-C e M-1, por sua vez, tiveram suas classes de desempenho reduzidas. Portanto, explicita-se novamente a possibilidade de rever a forma como é levada a cabo a avaliação dos requisitos de desempenho prescritos na NBR 13281 (ABNT, 2005), tal que se evidencia a possibilidade de associação destes com a ciclagem de ação de calor e choque térmico para fins de análise de desempenho em termos de durabilidade.

Finalmente, comparando os resultados de resistências mecânicas entre si, observa-se que a perda de resistência decorrente do choque térmico (variação percentual em módulo entre 42 dias com e sem ciclagem, denominada “ Δ ”), tanto para resistência à tração na flexão como para resistência à compressão axial, foi semelhante. Tal correlação ($R^2 = 78,2\%$) é apresentada na FIGURA 35, que apresenta as referidas variações percentuais decorrentes da ciclagem para ambas as resistências mecânicas ensaiadas.

FIGURA 35 – CORRELAÇÃO ENTRE VARIAÇÃO PERCENTUAL DE RESISTÊNCIAS MECÂNICAS DECORRENTE DO CHOQUE TÉRMICO



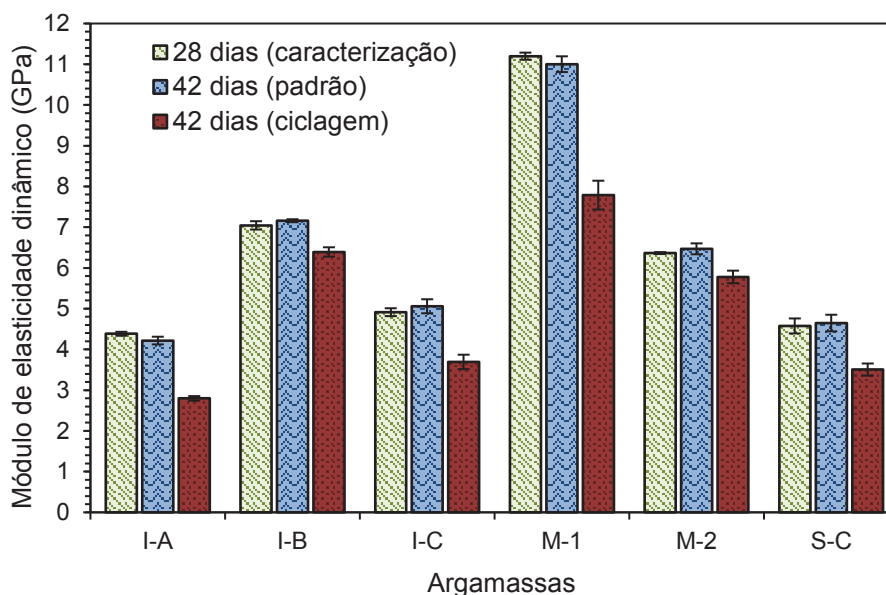
FONTE: O autor (2020).

Portanto, novamente o choque térmico demonstra ser importante em termos de resultado de caracterização das argamassas de revestimento, tal que sua aplicação poderia ser levada em conta em termos de verificação do desempenho através dos requisitos da NBR 13281 (ABNT, 2005). Assim, entende-se que seria possível associar a solicitação de ação de calor e choque térmico prescrita pela NBR 15575-4 (ABNT, 2013), nos moldes de adaptação propostos e viabilizados nesta pesquisa, com a avaliação de requisitos de desempenho no estado endurecido.

5.5.2.5 Módulo de elasticidade dinâmico

Este item demonstra os resultados obtidos quanto ao módulo de elasticidade dinâmico, através de propagação de onda ultrassônica, vide a NBR 15630 (ABNT, 2008). A FIGURA 36 ilustra tais resultados.

FIGURA 36 – MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

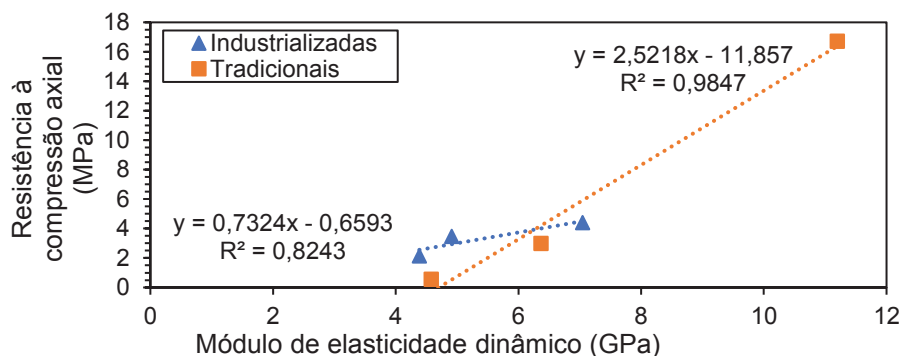


FONTE: O autor (2020).

Verifica-se o efeito do choque térmico sobre o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de revestimento. Tal qual discutido para outras propriedades avaliadas, o desempenho pós ciclagem aos 42 dias é inferior ao desempenho obtido para as argamassas de mesma idade sem terem sido submetidas ao choque térmico.

Ao avaliar primeiramente a caracterização aos 28 dias, é possível correlacionar os valores de módulo de elasticidade obtidos com os de resistência à compressão anteriormente apresentados, vide FIGURA 37. Assim, para ambos os grupos de argamassas, verifica-se uma proporcionalidade direta, com R^2 de 82,4% e 98,5%, para industrializadas e tradicionais, respectivamente. Tal constatação concorda com outros estudos (SELMO, 2002; KOU; POON, 2008; SILVA *et. al.*, 2016), vez que um material tende a ser mais rígido conforme haja incremento de sua resistência mecânica.

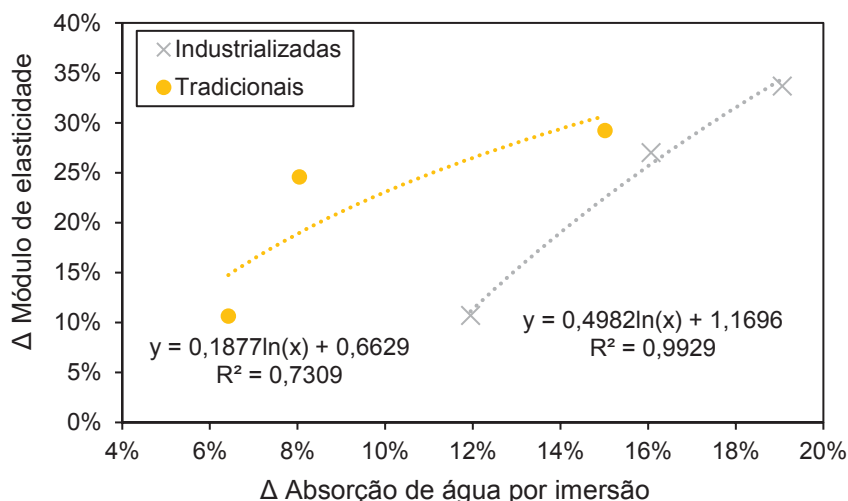
FIGURA 37 – CORRELAÇÃO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS E TRADICIONAIS



FONTE: O autor (2020).

Comparando-se isoladamente as formulações de cada grupo entre si, nota-se que há uma relação inversamente proporcional entre índice de vazios e módulo de elasticidade, tal que, ao passo que se aumentou o índice de vazios, reduziu-se o módulo de elasticidade. Esta correlação era esperada vez que a ondas ultrassônicas do ensaio atingem velocidades mais altas em materiais mais densos e menos porosos, podendo também estar associada a fissuras internas ou deterioração da argamassa (CHIES, 2014; CAMARA e WONS, 2018). Consoante a presente hipótese, correlaciona-se (FIGURA 38) a variação do módulo de elasticidade com a respectiva alteração observada para absorção de água por imersão, vez que ambas as propriedades estão correlacionadas com a possibilidade de fissuração. Nota-se, sem exceção, que quanto maior foi a perda de módulo de elasticidade (apresentada como valor absoluto no gráfico), maior foi o incremento de absorção de água por imersão. Por conseguinte, reforçam-se as considerações tecidas acerca dos indícios de fissuração das amostras submetidas à ciclagem (choque térmico).

FIGURA 38 – CORRELAÇÃO ENTRE A VARIAÇÃO ABSOLUTA DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO E ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO



FONTE: O autor (2020).

O ensaio de módulo de elasticidade dinâmico permite, além da avaliação da deformabilidade do material, inferir acerca de existência de fissuras (CHIES, 2014; CAMARA e WONS, 2018), vez que é realizado através da propagação de ondas ultrassônicas. Portanto, a variação média de módulo (estatisticamente significativa, vide demonstrado em APÊNDICE 4) possibilita embasar a viabilização da ciclagem proposta. Frisa-se que, conforme restou consolidado anteriormente, a densidade das amostras não sofreu variação média estatisticamente significativa, tal que – de fato – a degradação das amostras deve ser o fator principal na alteração desta propriedade.

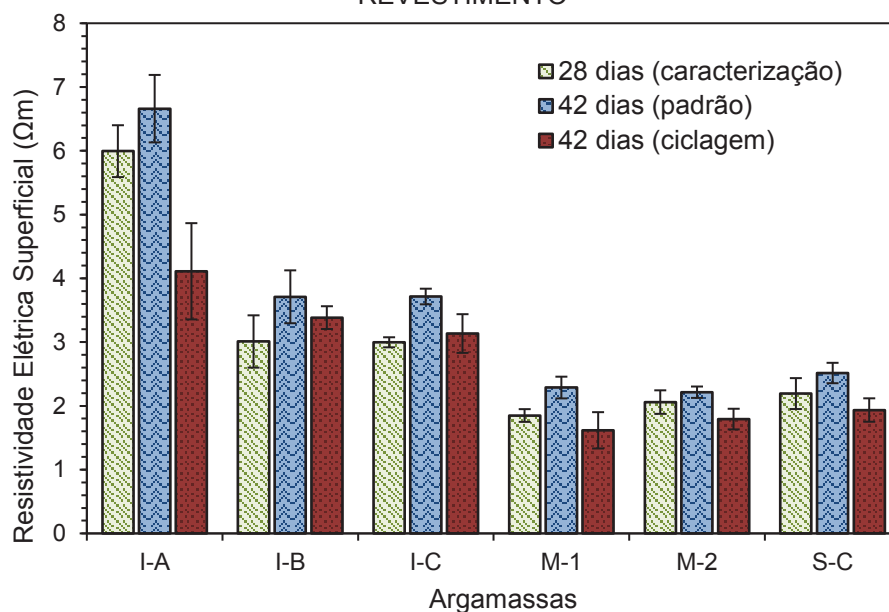
Finalmente, sob a ótica de limites de desempenho, embora a NBR 13281 (ABNT, 2005) não apresente classes de desempenho para esta propriedade, a NBR 16648 (ABNT, 2018) e a diretriz SINAT nº 006 R01 (PBQP-H, 2016) prescrevem um valor máximo de 12 GPa para argamassas de revestimento orgânicas do tipo técnico-decorativas. Assim, constata-se que as argamassas do presente estudo atenderam ao referido critério de desempenho.

5.5.2.6 Resistividade elétrica superficial

Neste item são apresentados os resultados de resistividade elétrica superficial, segundo diretrizes da norma espanhola 83988-2 (UNE, 2014). Reitera-se que esta propriedade é uma medida indireta da quantidade e conectividade de

poros do material, sendo um importante parâmetro para medida das propriedades de transporte de massa e do grau de degradação de compostos cimentícios (WANG *et al.*, 2013; MEDEIROS-JUNIOR, 2014). Por outro lado, haja vista que os parâmetros de avaliação deste ensaio disponíveis na literatura são definidos para concretos, a análise ora empregada é de ordem relativa, e não absoluta.

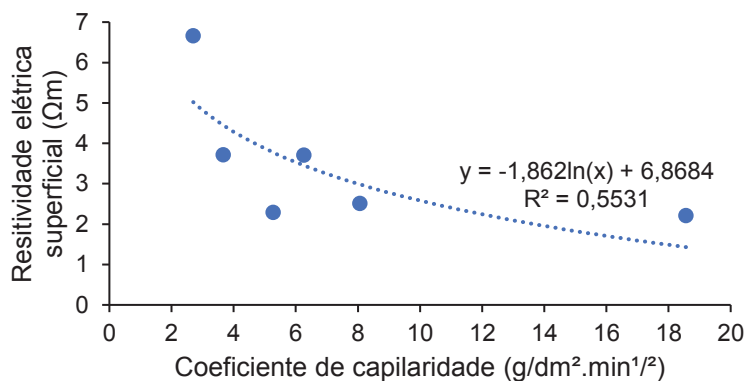
FIGURA 39 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO



FONTE: O autor (2020).

Em observação aos resultados, nota-se que as argamassas industrializadas apresentaram valores de resistividade elétrica superficial maiores que as argamassas tradicionais. Vide destacam Zeng *et al.* (2020), a resistividade decresce conforme maior é a absorção de água por capilaridade. Ao correlacionar os resultados das duas propriedades ora discutidas, verifica-se que as argamassas de revestimento avaliadas apresentaram a mesma tendência, conforme ilustrado em FIGURA 40. Além disso, as argamassas industrializadas possuem menor relação a/ms que as argamassas tradicionais, que também é um fator que contribui, embora indiretamente, na resistividade elétrica (SANTOS, 2006; MENDES *et al.*, 2018).

FIGURA 40 – CORRELAÇÃO ENTRE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL E COEFICIENTE DE CAPILARIDADE

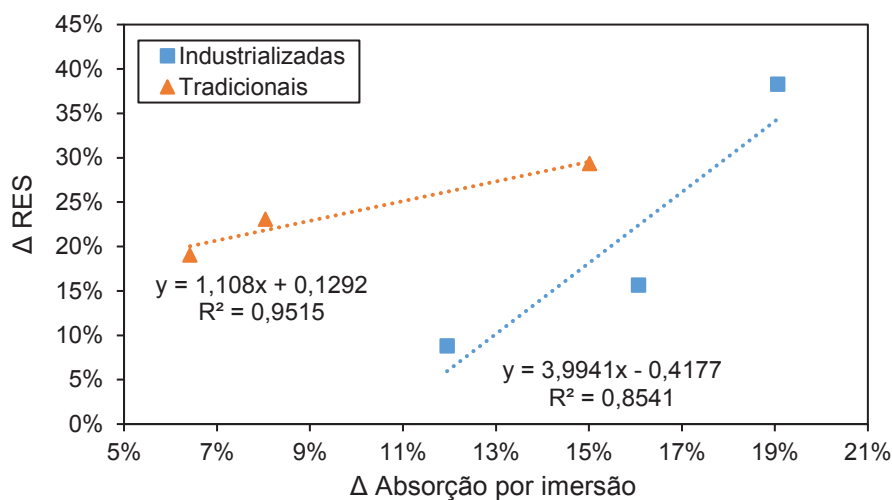


FONTE: O autor (2020).

Analisando o comportamento das argamassas de revestimento de forma geral, foi possível observar um crescimento da resistividade entre 28 e 42 dias de idade, consoante demais estudos (HOSSAIN *et al.*, 2009; NAYAKA *et al.*, 2018; BALESTRA *et al.*, 2019). Por outro lado, nota-se queda de desempenho para os resultados de 42 dias de idade em decorrência da ciclagem. Dessa forma, é possível afirmar que houve degradação decorrente do choque térmico, possivelmente devido à fissuração das amostras submetidas à ciclagem. Tal conclusão é respaldada pelas demais caracterizações obtidas.

É possível correlacionar a variação percentual, decorrente do efeito da ciclagem, de resistividade elétrica com a de absorção de água por imersão, vez que ambas as propriedades são utilizadas como indicativos de conectividade de poros. A FIGURA 41 (valores em módulo) ilustra graficamente esta correlação, tal que ao passou que se reduziu a resistividade, aumentou-se a absorção de água, indicando que ambos ensaios indicam degradação.

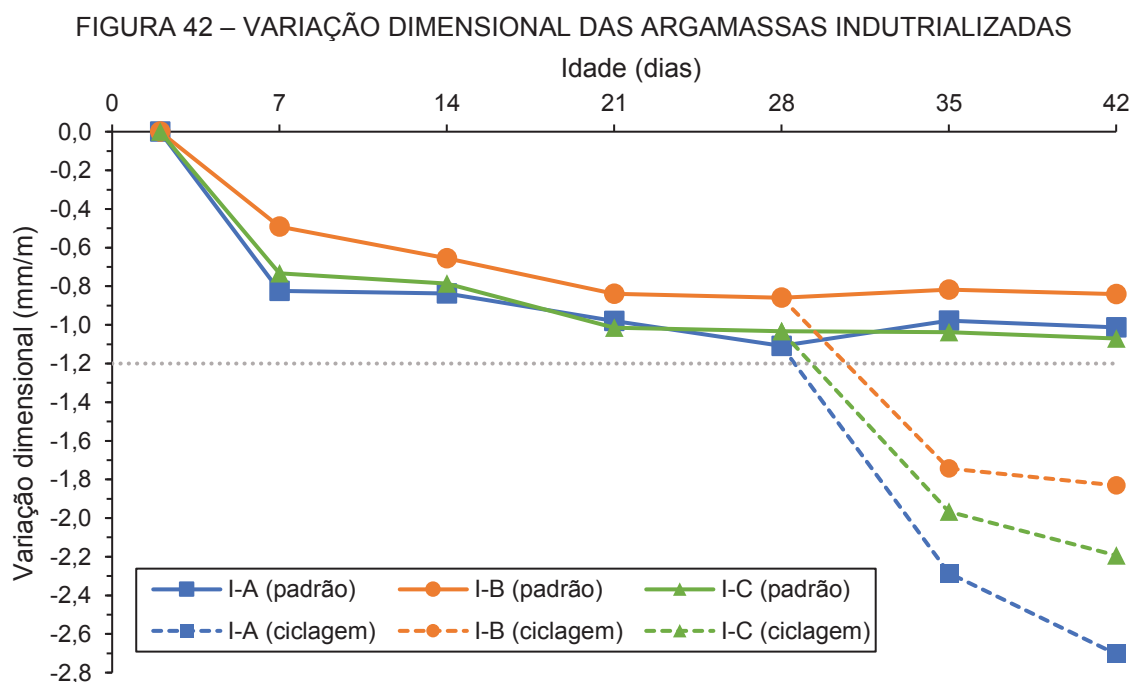
FIGURA 41 – CORRELAÇÃO ENTRE VARIAÇÃO PERCENTUAL EM MÓDULO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL E ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO COMO CONSEQUÊNCIA DO CHOQUE TÉRMICO



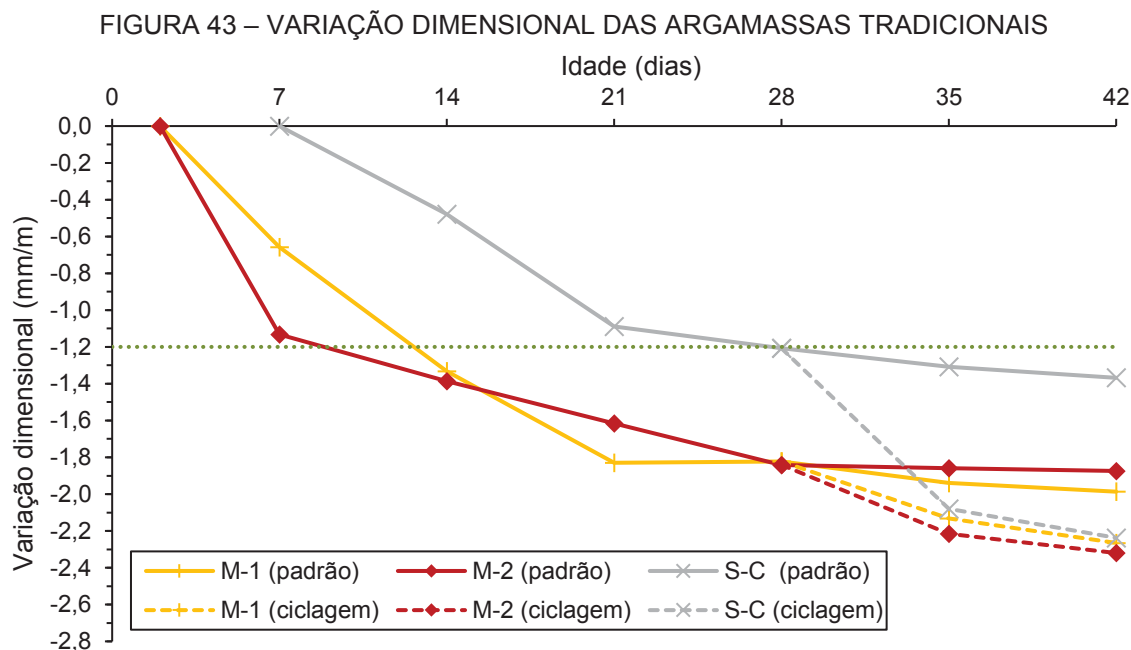
FONTE: O autor (2020).

5.5.2.7 Variação dimensional

A FIGURA 42 e a FIGURA 43 apresentam os resultados do ensaio de variação dimensional (valores negativos indicam retração) para as argamassas industrializadas e tradicionais, respectivamente. Destaca-se que os referidos gráficos ilustram, em forma de linha tracejada, o limite de 1,2 mm/m, recomendado pela NBR 16648 (ABNT, 2018).



FONTE: O autor (2020).



FONTE: O autor (2020).

Ao atentar-se à caracterização durante o período de ciclagem, é possível observar que o choque térmico afetou consideravelmente a variação dimensional de todas as argamassas, implicando em um representativo crescimento de retração das amostras. Entende-se que tal comportamento é explicado pela contração volumétrica decorrente do resfriamento pós aquecimento. Conforme pontuam Mehta e Monteiro (2006), para materiais cimentícios, que possuem baixa resistência à tração (caso das argamassas), o efeito resultante da contração térmica é mais significativo que o da expansão. Assim, após sofrer uma expansão inicial durante o aquecimento, a retração decorrente do choque térmico demonstrou ser mais significativa. Portanto, a solitação durante o resfriamento brusco pode ter resultado em fissuração – corroborando discussões das demais propriedades acerca do efeito da ciclagem sobre as argamassas de revestimento.

Por outro lado, observa-se que o grupo de argamassas tradicionais apresentou maiores retrações que o grupo das argamassas industrializadas para a caracterização sem ciclagem. Tal constatação possivelmente é justificada pela quantidade de água na mistura, vez que a relação a/ms é maior para as argamassas tradicionais em relação às industrializadas.

Quanto às argamassas industrializadas, nota-se que o comportamento de retração demonstrado entre as formulações I-A, I-B e I-C foi consideravelmente semelhante, com variação dimensional oscilando entre -0,86 e -1,11 mm/m aos 28 dias de idade. Infere-se, portanto, que tais argamassas atenderam ao requisito de 1,2 mm/m (retração) aos 28 dias, especificado pela NBR 16648 (ABNT, 2018). O mesmo acontece para 42 dias sem ciclagem. Contudo, verifica-se que o choque térmico refletiu em aumento da retração, de modo que as argamassas I-A, I-B e I-C deixam de atender ao limite especificado para 42 dias com ciclagem. Constata-se um aumento de 167%, 118% e 105%, comparando os resultados aos 42 dias sem e com ciclagem para as argamassas I-A, I-B e I-C, respectivamente.

Ademais, constata-se que as formulações tradicionais não atenderam ao requisito de 1,2 mm/m aos 28 dias de idade, prescrito na NBR 16648 (ABNT, 2018). Além disso, verificou-se interferência da ciclagem sobre a propriedade avaliada, tal que o choque térmico prejudicou o desempenho das formulações de argamassas de revestimento, sem exceção. Para as argamassas M-1, M-2 e S-C verifica-se, comparando a variação dimensional aos 42 dias sem e com ciclagem, um aumento de 14%, 24% e 64%, respectivamente. Por conseguinte, evidencia-se novamente o efeito da ciclagem proposta sobre o desempenho das argamassas estudadas.

Além disso, através dos critérios da NBR 16648 (ABNT, 2018), é possível avaliar a suscetibilidade à fissuração, conforme anteriormente explanado em item 2.4. Assim, resume-se tal análise na TABELA 27, que demonstra a suscetibilidade à fissuração para as argamassas aos 42 dias de idade sem e com ciclagem.

TABELA 27 – AVALIAÇÃO QUANTO À SUSCETIBILIDADE À FISSURAÇÃO DAS ARGAMASSAS AOS 42 DIAS DE IDADE COM E SEM CICLAGEM

Argamassa	Suscetibilidade à fissuração					
	Variação dimensional (mm/m)		Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)		Módulo de elasticidade dinâmico (GPa) / Resistência à tração na flexão (MPa)	
	Sem ciclagem	Com ciclagem	Sem ciclagem	Com ciclagem	Sem ciclagem	Com ciclagem
I-A	Média (1,0)	Forte (2,7)	Fraca (4,2)	Fraca (2,8)	Média (3,1)	Média (3,3)
I-B	Média (0,8)	Forte (1,8)	Média (7,2)	Fraca (6,4)	Forte (3,7)	Forte (4,6)
I-C	Média (1,1)	Forte (2,2)	Fraca (5,1)	Fraca (3,7)	Fraca (2,5)	Forte (4,2)
M-1	Forte (2,0)	Forte (2,3)	Média (11,0)	Média (7,8)	Média (2,6)	Fraca (2,5)
M-2	Forte (1,9)	Forte (2,3)	Fraca (6,5)	Fraca (5,8)	Forte (6,4)	Forte (6,1)
S-C	Forte (1,4)	Forte (2,2)	Fraca (4,6)	Fraca (3,5)	Forte (10,2)	Forte (10,4)

FONTE: O autor (2020).

Ao analisar a suscetibilidade à fissuração das argamassas de revestimento, destaca-se que existem 3 critérios aplicáveis conforme a NBR 16648 (ABNT, 2018). Todavia, para o caso em particular de avaliação frente ao choque térmico, faz-se necessário ressaltar alguns aspectos relevantes. Primeiramente, quanto ao Módulo de elasticidade dinâmico, pondera-se que houve redução do valor desta propriedade com o advento da ciclagem, possivelmente em decorrência da fissuração das amostras por conta do choque térmico – tal como discutido anteriormente. Assim, em virtude deste fenômeno, um menor valor de velocidade de propagação da onda ultrassônica foi observado, reduzindo assim o valor do módulo de elasticidade dinâmico. Portanto, apesar de reconhecer que um material mais rígido tende a ser mais suscetível à fissuração, entende-se que este critério não é representativo nesta situação em particular, já que a ocorrência de fissuração refletiu em redução do módulo de elasticidade, que seria avaliada como positiva em relação ao desempenho de durabilidade sob este critério. A mesma consideração é válida para o critério “Módulo de elasticidade/Resistência à tração na flexão”. Por conseguinte, a avaliação considerada válida nesta discussão é a suscetibilidade à fissuração decorrente da variação dimensional apenas.

Isto posto, verifica-se, de antemão, para 42 dias sem ciclagem, que as argamassas industrializadas possuem média tendência à fissuração, enquanto as argamassas tradicionais possuem suscetibilidade considerada forte. Todavia, ao analisar as formulações submetidas à ciclagem, nota-se que todas refletem em forte

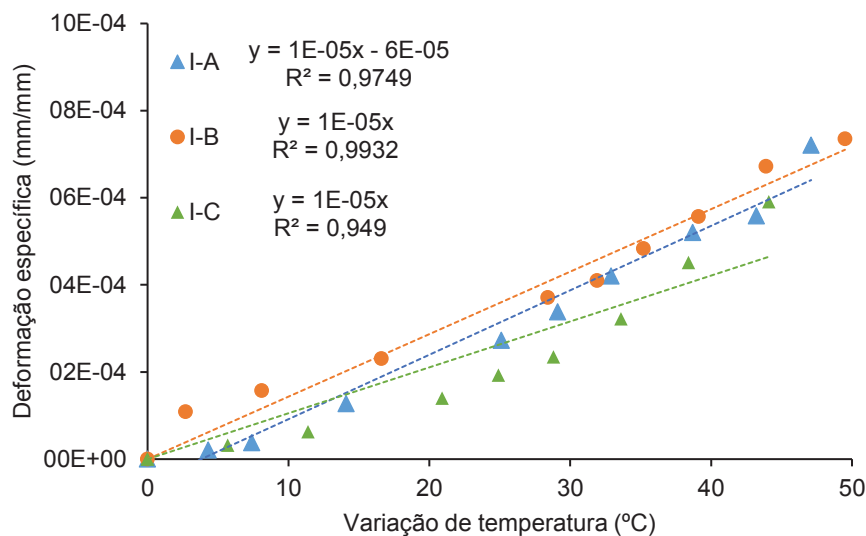
suscetibilidade à fissuração. Ou seja, as argamassas industrializadas mudaram de classe, de forma que o desempenho foi prejudicado e, por outro lado, as tradicionais mantiveram a classe “forte”, já que não existe outra classe além desta para valores de variação dimensional superiores. Assim, conforme discutido para as outras propriedades avaliadas, a ciclagem de fato interferiu no desempenho das argamassas de estudo, de modo que existem diversos indícios de ocorrência de fissuração das amostras, inclusive pelo presente resultado de variação dimensional, que indicou forte suscetibilidade à fissuração para todas as argamassas submetidas ao choque térmico.

5.5.2.8 Dilatação térmica

Este item trata da avaliação da dilatação térmica das argamassas de revestimento estudadas para o intervalo de temperatura do ensaio de ação de calor e choque térmico (20 a 80°C).

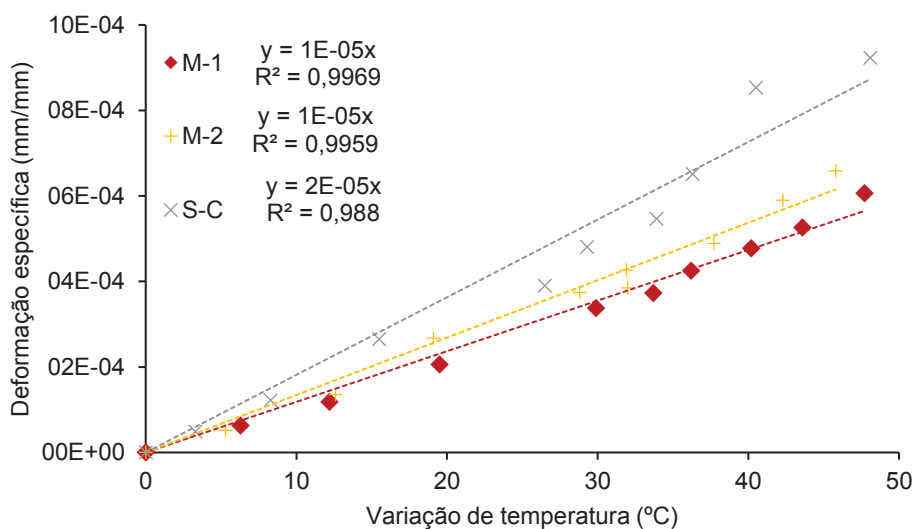
Por meio de regressão linear, fixando a origem (0,0) como interseção (já que sem variação de temperatura não deve haver expansão), foi possível ainda determinar a equação quadrática do comportamento, com o respectivo R^2 . A FIGURA 44 e a FIGURA 45 ilustram o comportamento observado quando da variação de temperatura de 20 a 80°C das argamassas industrializadas e tradicionais, respectivamente, indicando a variação de temperatura no eixo das abscissas e a deformação específica resultante (expansão térmica) no eixo das ordenadas.

FIGURA 44 – DILATAÇÃO TÉRMICA DAS ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 45 – DILATAÇÃO TÉRMICA DAS ARGAMASSAS TRADICIONAIS



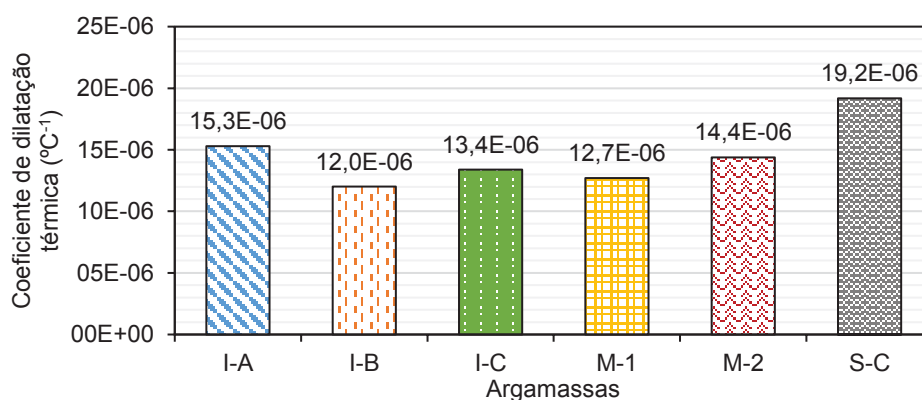
FONTE: O autor (2020).

Entende-se que, possivelmente, o complexo comportamento da matriz cimentícia, a interação das fases da mistura, distribuição dos poros (tensões decorrentes do ar nos poros quando da aplicação de temperatura), além de outros fatores de ordem microestrutural, justifiquem este comportamento não linear, uma vez que para temperaturas mais elevadas (sendo as máximas próximas à 80°C, neste caso) o acréscimo de temperatura implica numa variação dimensional

superior àquela causada para faixas de temperatura mais amenas (próximas à 20° C para este procedimento). Ressalta-se que as argamassas industrializadas possuem insumos distintos entre si (aditivos químicos dentre eles) que tornam seu comportamento consideravelmente mais complexo que o das tradicionais.

Sequencialmente, aprofundando a avaliação, estimaram-se os coeficientes de dilatação térmica (α), conforme EQUAÇÃO 7. O resultado é apresentado em FIGURA 46. Correlacionando a FIGURA 44 e a FIGURA 45 com a FIGURA 46, verifica-se que os resultados são condizentes entre si.

FIGURA 46 – COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

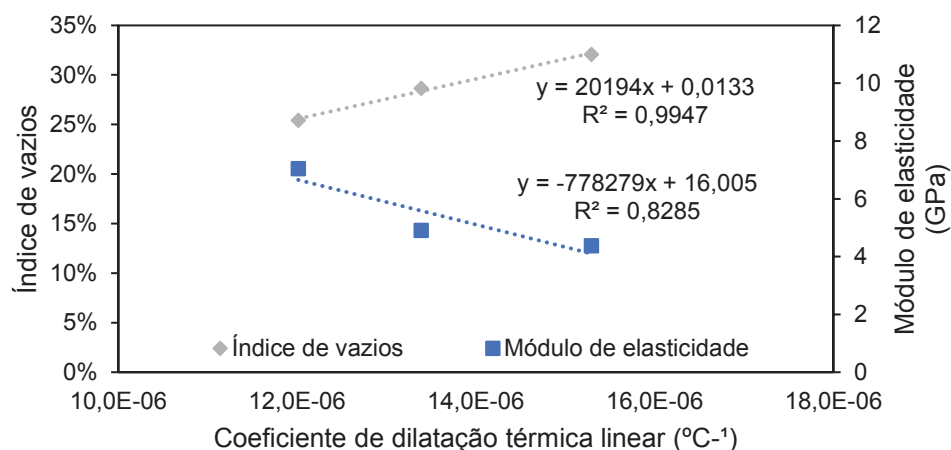


FONTE: O autor (2020).

Tal qual esperado, os coeficientes de dilatação térmica (FIGURA 46) refletem o comportamento observado preteritamente na FIGURA 44 e na FIGURA 45. Portanto, analisando separadamente os dois grupos, observa-se correlação dos coeficientes de dilatação térmica com a caracterização quanto ao módulo de elasticidade e ao índice de vazios. Ou seja, tanto para as argamassas industrializadas quanto para as tradicionais, o aumento do índice de vazios e a redução do módulo de elasticidade resultaram em maiores coeficientes de dilatação térmica. A proporcionalidade direta entre porosidade e dilatação térmica é descrita na literatura (GHABEZLOO, 2010), fortalecendo a discussão explanada anteriormente. Por outro lado, o módulo de elasticidade, além de estar relacionado aos vazios, afeta a deformabilidade dos materiais – possivelmente explicando maiores dilatações conforme o seu decréscimo. Tal correlação pode ser observada

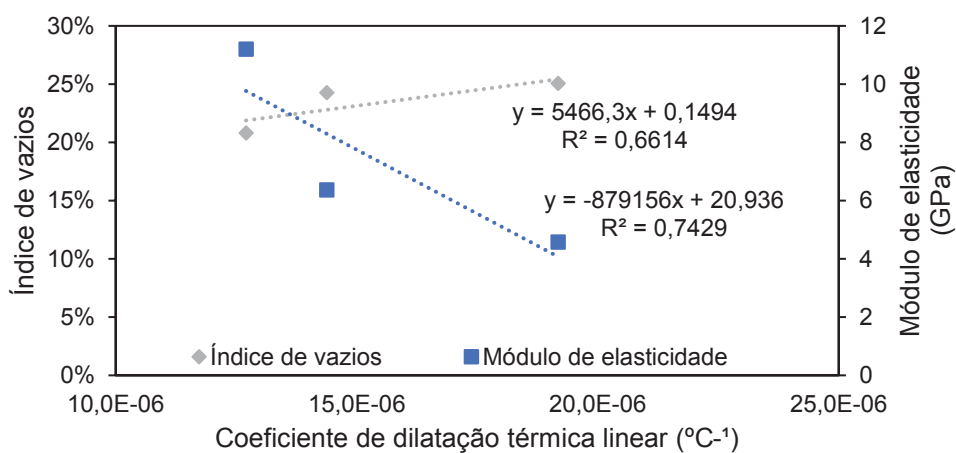
na FIGURA 47 e na FIGURA 48 para as argamassas industrializadas e tradicionais, respectivamente, com indicação dos R^2 .

FIGURA 47 – CORRELAÇÃO ENTRE COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA, ÍNDICE DE VAZIOS E MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 48 – CORRELAÇÃO ENTRE COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA, ÍNDICE DE VAZIOS E MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA ARGAMASSAS TRADICIONAIS

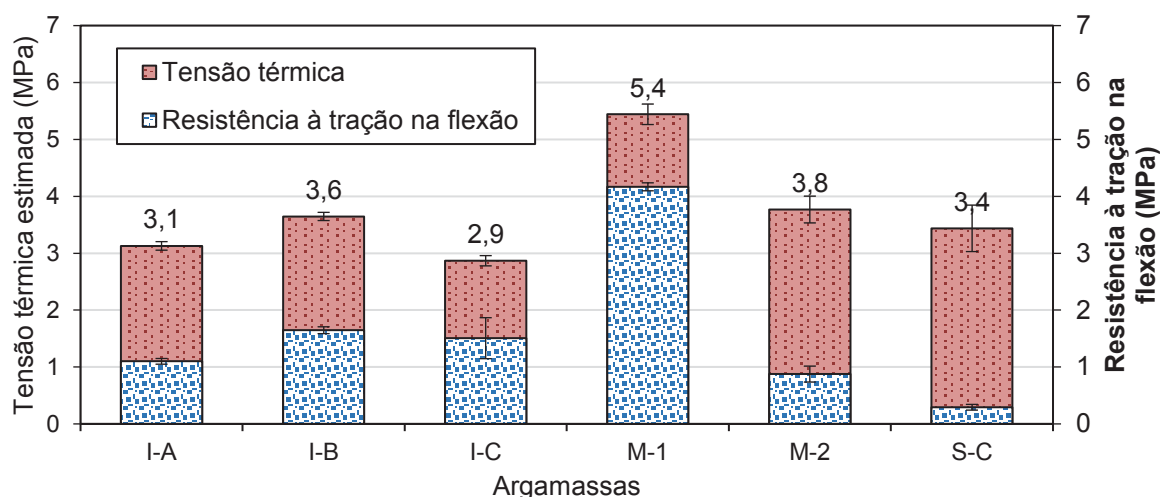


FONTE: O autor (2020).

Destaca-se que os resultados obtidos corroboram as faixas de valores de coeficiente de dilatação térmica determinados experimentalmente por outros autores para argamassas e pastas de cimento, variando entre 9 e 20×10^{-6} (MEYERS, 1940; RANSOM, 1987; FIORITO, 1994; SARAIVA, 1998; ZENG *et al.*, 2012), indicando validação do método utilizado.

Finalmente, é possível estimar as tensões térmicas para cada formulação de argamassa, decorrente de seu gradiente de temperatura máximo (FIGURA 21), conforme modelo de Timoshenko e Goodier (1968). Os resultados estão apresentados na FIGURA 49.

FIGURA 49 – TENSÃO TÉRMICA DE TRAÇÃO ESTIMADA E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO



FONTE: O autor (2020).

Constate-se, portanto, que a tensão térmica solicitante foi superior à resistência à tração na flexão para todas as formulações de argamassa de revestimento. Ou seja, $\tau \geq \tau_c$, tal que há indícios de que tenha ocorrido fissuração das amostras.

Contudo, é importante ressaltar que o modelo aplicado considera o material homogêneo, o que – na prática – não se observa em argamassas de revestimento. Portanto, reconhece-se a limitação do modelo aplicado. Por outro lado, para fins de indicativo de possível ocorrência de fissuração, finalidade para qual o mesmo foi empregado, entende-se que é aplicável. Assim, demais discussões e correlações não serão abordadas.

5.5.3 Estudo de viabilidade

Findadas as discussões acerca das propriedades avaliadas, o presente item discorre acerca da viabilização e validação do método proposto. Assim, é apresentado um breve estudo comparativo com o procedimento de ensaio prescrito

no Anexo E da NBR 15575-4 (ABNT, 2013), sob a ótica de aspectos de ordem técnica, ambiental, econômica e social.

Importante frisar que o método proposto é complementar ao indicado na norma de desempenho, que diz respeito ao SVVE como um todo (considerando todos os elementos) enquanto o procedimento adaptado estudado restringe-se ao componente argamassa do elemento revestimento. Importante ressaltar ainda quanto à escala de análise, que se torna laboratorial para o procedimento proposto, através de corpos de prova prismáticos, diferentemente do procedimento de referência, cuja execução se dá em uma parede com dimensões em escala real.

Outrossim, destaca-se que o APÊNDICE 1 contém uma cartilha com instruções para execução do método proposta em sua configuração final. Destarte, conforme discutido, sugere-se aplicar o procedimento de ação de calor e choque térmico nos moldes ora propostos em associação à avaliação de desempenho mediante os requisitos da NBR 13281 (ABNT, 2005) e NBR 16648 (ABNT, 2018). Portanto, o método, em sua proposta final, aplica somente os ensaios de:

- “determinação da resistência à tração na flexão e à compressão axial” (ABNT NBR 13.279);
- “determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica” (ABNT NBR 15630);
- “determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade” (ABNT NBR 15259);
- “determinação da variação dimensional” (ABNT NBR 15261).

Explica-se que tal seleção é respaldada nas propriedades que possuem requisitos delimitados pelas normas de referência supracitadas, podendo, assim, inferir sobre o desempenho quanto à durabilidade.

5.5.3.1 Viabilidade técnica

Primeiramente, é importante frisar que os parâmetros de ciclagem foram mantidos em relação ao método original. Assim, as faixas de temperatura permaneceram as mesmas; além disso, os tempos de ciclagem mantiveram os mesmos intervalos de tempo propostos pela NBR 15575-4 (ABNT, 2013). Alterou-

se, em realidade, o objeto de avaliação, os equipamentos e métodos de aferição aplicados, além das dimensões dos corpos de prova. Além disso, foram avaliadas outras propriedades, de maneira quantitativa, não previstas no ensaio de referência, permitindo maior assertividade quanto à análise.

Sob outra ótica, consolidando a argumentação ora apresentada, frisa-se que os resultados obtidos quanto às propriedades do estado endurecido das argamassas de revestimento estudadas comprovaram o efeito do choque térmico na degradação das formulações industrializadas e tradicionais. Assim, a TABELA 28 ilustra a degradação resultante para cada propriedade avaliada, em termos de variação percentual de valor de caracterização. O método de ciclagem proposto de fato degradou as amostras, afetando suas propriedades no estado endurecido.

TABELA 28 – DEGRADAÇÃO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO AOS 42 DIAS DE IDADE DECORRENTE DO CHOQUE TÉRMICO

Argamassa	Degradação (variação percentual média)					
	Coeficiente de Capilaridade	Resistência à tração na flexão	Resistência à compressão axial	Módulo de elasticidade dinâmico	RES	Variação dimensional
I-A	32,1%	-37,8%	-48,8%	-33,7%	-38,3%	-166,8%
I-B	14,4%	-29,2%	-28,0%	-10,7%	-8,8%	-117,8%
I-C	29,1%	-55,4%	-45,7%	-27,0%	-15,6%	-104,9%
M-1	23,8%	-25,7%	-22,6%	-29,2%	-29,3%	-64%
M-2	5,9%	-5,6%	-11,6%	-10,6%	-19,0%	-14%
S-C	28,7%	-25,7%	-32,6%	-24,6%	-23,1%	-24%

Nota: A variação percentual média indicada é entre a caracterização aos 42 dias de idade sem e com ciclagem. Assim, valores positivos (+) indicam que a ciclagem elevou os valores resultantes, enquanto valores negativos (-) indicam decréscimo dos resultados decorrente da ação de calor e choque térmico.

FONTE: O autor (2020).

Por meio da avaliação das propriedades do presente estudo, é possível correlacionar a caracterização pós-ciclagem com as classes de desempenho estipuladas pela NBR 13281 (ABNT, 2005), tal que a verificação do comportamento é dada de forma quantitativa. Ou seja, evidencia-se a possibilidade de rever os conceitos aplicados aos requisitos de desempenho da referida norma, vez que esta não considera o efeito do choque térmico sobre as propriedades analisadas.

Outra avaliação necessária para validação diz respeito aos conceitos de repetitividade e reprodutibilidade. Com auxílio da análise estatística, mais especificamente por meio do teste de Grubbs (1969), verificou-se que os dados

remanescentes, após aplicação do critério de exclusão, são representativos dentro das amostras avaliadas. Por conseguinte, entende-se que o método possui característica aceitável de repetitividade.

A reprodutibilidade, por sua vez, foi comprovada através da análise estatística ANOVA (disponível em APÊNDICE 4), que comprova que há – para todas as propriedades avaliadas após a ciclagem – diferença estatística significativa para diferentes argamassas de revestimento ensaiadas. O método proposto possui sensibilidade para avaliar diferentes formulações, sendo considerado viável tecnicamente quanto a este quesito.

5.5.3.2 Viabilidade ambiental

Além das questões apresentadas inicialmente em item 1.2 e demais discussões percorridas ao longo deste documento, frisa-se quanto ao descarte dos materiais ensaiados. O procedimento de ensaio contido no Anexo E da NBR 15575-4 (ABNT, 2013) resulta em descarte de material de aproximadamente 2,3 (1,15x2,0) m³ por ensaio. Por outro lado, conforme demonstrado em TABELA 29, o método complementar proposto permite diminuir tal quantidade para apenas 0,04 (0,02x2,0) m³. Assim, os resíduos resultantes do método complementar proposto correspondem somente a cerca de 1,7% do gerado pelo procedimento de referência – indicando viabilidade em sua implementação sob esta ótica.

TABELA 29 – ESTIMATIVA DE VOLUME DE DESCARTE DECORRENTE DO MÉTODO PROPOSTO PARA CADA AMOSTRA ENSAIADA

Ensaio	Corpo de prova	Quantidade	Volume
Resistência à tração na flexão e à compressão axial	4x4x16 cm ³	3	0,0077 m ³
Módulo de elasticidade dinâmico	4x4x16 cm ³	3	0,0077 m ³
Absorção por capilaridade	4x4x16 cm ³	3	0,0077 m ³
Variação dimensional	2,5x2,5x28,5 cm ³	3	0,0005 m ³
TOTAL			0,0236 m³

FONTE: O autor (2020).

5.5.3.3 Viabilidade socioeconômica

Quanto ao aspecto estritamente econômico, para fins de comparação de custo, desenvolveu-se estudo comparativo de custos. O APÊNDICE 3 demonstra o custo resultante para execução do ensaio contido no Anexo E da NBR 15575-4 (ABNT, 2013) e, também, os custos desprendidos com o método de ensaio proposto nesta pesquisa – por meio da TABELA 30 e da TABELA 31, respectivamente.

Observa-se, portanto, que o método original demanda o custo de execução da ordem de R\$ 8.328,62, enquanto o procedimento adaptado proposto somente R\$ 144,82. Ou seja, a implementação do procedimento complementar demandaria um investimento de apenas 1,7% do custo do método de referência, demonstrando, por conseguinte, sua viabilidade e benefício socioeconômico.

5.6 CONCLUSÕES

Tendo em vista os objetivos delineados inicialmente, assim como os resultados e discussões expostos neste capítulo, são apresentadas neste item as principais conclusões do mesmo:

- a ciclagem de ação de calor e choque térmico implicou em perda de resistência mecânica (tração na flexão e compressão axial) de todas as formulações de argamassa de revestimento (ressalvando que apenas para M-2 a redução não foi estatisticamente significativa). Tal degradação resultou em alteração da classe de desempenho consoante requisitos da NBR 13281 (ABNT, 2005). As perdas de resistências variaram de 5% (M-2) a 55% (I-C);
- os ensaios de módulo de elasticidade dinâmico (realizado através de propagação de onda ultrassônica) e RES indicaram perda de desempenho decorrente da aplicação da ciclagem de ação de calor e choque térmico desenvolvida, sugerindo possível fissuração das amostras. As perdas de RES alternaram de 8,8% (I-B) a 38,3% (I-A), enquanto a redução do módulo de elasticidade dinâmico variou de 10,6% (M-2) a 33,7% (I-A).
- os resultados de variação dimensional demonstraram o significativo efeito da ciclagem sobre o desempenho das argamassas. Além disso, foi possível reclassificar o grau de suscetibilidade à fissuração decorrente da caracterização pós ação de calor e choque térmico, de modo que todas as formulações resultaram em um grau “forte”, consoante demais discussões explanadas. As variações desta propriedade, por conta do choque térmico, alternaram de 14% (M-2) a 166,8% (I-A).
- a única propriedade que não apresentou significativa interferência da ação de calor e choque térmico foi a densidade de massa aparente no estado endurecido. Tal observação, no entanto, mostra-se justificável, haja vista que após serem submetidas à ciclagem, as argamassas retornaram à condição de exposição padrão das demais, além de questões relacionadas à sensibilidade do ensaio em si;
- as argamassas industrializadas apresentaram maior perda de desempenho decorrente do efeito da ciclagem de ação de calor e choque térmico em comparação às argamassas tradicionais, considerando a média de variação

percentual. Pelo mesmo critério, a argamassa mais sensível à ciclagem foi a I-A, enquanto a que sofreu menor impacto foi a M-2 (1:2:9, em volume).;

- o estudo demonstrou viabilidade de aplicação do mesmo sob os aspectos técnico, ambiental, social e econômico. Constatou-se, portanto, que é possível aprimorar a avaliação do componente argamassa de revestimento com acréscimo de cerca de apenas: 1,7% de geração de resíduos; e 1,7% de custos. Além disso, pelas questões discutidas, o método pode conferir maior acessibilidade aos laboratórios e aos usuários, conferindo benefícios de ordem social;
- a avaliação de desempenho através dos requisitos da NBR 13281 (ABNT, 2005) poderia ser revisada, considerando a aplicação da ação de calor e choque térmico para definição das classes de desempenho.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista os objetivos delineados inicialmente, assim como os resultados e discussões expostos no presente trabalho, conclui-se que foi possível propor um método de ensaio para a verificação do comportamento de argamassas de revestimento vertical externo expostas à ação de calor e choque térmico, a partir de adaptação do ensaio indicado no Anexo E da Norma de Desempenho - NBR 15575-4 (ABNT, 2013). A aplicação do método complementar proposto demonstrou seu efeito sobre as propriedades das argamassas de revestimento. Além disso, verificou-se a existência de viabilidade de sua implementação sob os aspectos técnico, econômico, social e ambiental.

Ademais, verificou-se que a ação de calor e choque térmico (solicitação estabelecida pela Norma de Desempenho para fins de avaliação da durabilidade) alterou a caracterização dos requisitos de desempenho das argamassas de revestimento prescritos pela NBR 13281 (ABNT, 2005). Contudo, embora ambas as referidas normas remetam ao desempenho, os requisitos propostos são tratados de maneira desconexa entre si, tal que a NBR 13281 (ABNT, 2005) não considera o efeito da ação de calor e choque térmico sobre as propriedades avaliadas. Portanto, conclui-se que a determinação destes requisitos de desempenho poderia ser revista, de forma a incluir o fenômeno ora abordado, viabilizando considerar o viés da durabilidade com respaldo na NBR 15575-4 (ABNT, 2013).

6.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Com a realização deste estudo, alguns aspectos resultaram em indicações de outros trabalhos de pesquisa que podem conferir avanço no conhecimento científico sobre a avaliação da durabilidade de argamassas de revestimento:

- estudar a correlação do desempenho frente à ciclagem de ação de calor e choque térmico com vida útil real em serviço;
- estudar comparativamente os resultados experimentais obtidos através do método proposto de verificação do comportamento de argamassas de revestimento expostas à ação de calor e choque térmico com o método original na NBR 15575-4 (ABNT, 2013);

- estudar os efeitos da aplicação de diferentes quantidades de ciclos de ação de calor e choque térmico sobre as argamassas de revestimento;
- estudar inserção de parâmetros de resistividade elétrica superficial (RES) como requisito de desempenho para argamassas de revestimento;
- estudar os intervalos de tempo das etapas de ciclagem de ação de calor e choque térmico para demais formulações de argamassa de revestimento, com intuito de confirmar o indicativo de tempo padrão de 1 hora e 30 minutos para aquecimento (acrescidos de 1 hora) e 30 minutos para resfriamento;
- estudar a aplicação do procedimento proposto em argamassas com restrição externa de movimentação dos corpos de prova;
- replicar o método proposto e avaliar a resistência potencial de aderência à tração, além das propriedades analisadas neste estudo, buscando aprimorar o mesmo;
- estudar modelagem de comportamento térmico de argamassas de revestimento para comparar com resultados experimentais;
- estudar a possibilidade de propor diferentes requisitos de desempenho conforme o clima regional, adaptando os contidos na NBR 13281 (ABNT, 2005).

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C1185-08**: Standard Test Methods for Sampling and Testing Non-Asbestos Fiber-Cement Flat Sheet, Roofing and Siding Shingles, and Clapboards. Pensilvânia, Estados Unidos, 2012.

ANDRADE, C. **Calculation of initiation and propagation periods of service life of reinforcement by using the electrical resistivity**. International symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, RILEM. 2004.

ANGELIM, R. R. **Influência da adição de finos calcários, silicosos e argilosos no comportamento das argamassas de revestimentos**. Goiânia, 2000. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (AENOR). **UNE 83988-2**: Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 2: Método de las cuatro puntas de Wenner. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9.778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 12815**: Concreto endurecido — Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13749**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15220-1**: Desempenho térmico de edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro. 2005.

_____. **NBR 15258:** Argamassa para revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15259:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15261:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15575-1:** Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro, 2013a.

_____. **NBR 15575-4:** Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 4: requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro, 2013b.

_____. **NBR 15630:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 16541:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 16648:** Argamassas inorgânicas decorativas para revestimento de edificações - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 30:** Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 45:** Agregados - Determinação de massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

AUSTRALIAN BUILDING CODES BOARD (ABCB). **Durability in Buildings.** Handbook, Guideline Document, ed., A.B.C. Board, 2006.

BALESTRA, C.E.T.; NAKANO, A.Y.; SAVARIS, G.; MEDEIROS-JUNIOR, R.A. **Reinforcement corrosion risk of marine concrete structures evaluated through electrical resistivity:** Proposal of parameters based on field structures, Ocean Engineering, Volume 187, 2019, 106167, ISSN 0029-8018.

BARBOSA, A. S. **Estudo numérico-computacional e analítico do choque térmico em fachadas de edificações**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 2013, 275 p.

BAUER, E. **Resistência a Penetração da Chuva em Fachadas de Alvenaria de Materiais Cerâmicos** – Uma Análise de Desempenho. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1987, 168p.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção: novos materiais de construção**. 5. ed. v. 2. Rio de Janeiro: LTC, 1994.

BOCHEN J. **Study on the microstructure of thin-layer facade plasters of thermal insulating system during artificial weathering**. Constr Build Mater 2009;23:2559–66. 2009.

BOCHEN, J. **Weathering effects on physical–chemical properties of external plaster mortars exposed to different environments**. Construction and Building Materials. 79. 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.079. 2015.

CABRAL, M. R.; NAKANISHI, E. Y.; FIORELLI, J. **Evaluation of the Effect of Accelerated Carbonation in Cement–Bagasse Panels after Cycles of Wetting and Drying**. Journal of Material in Civil Engineering. v. 29 (6), p. 1-7, 2017.

CAGGIANO, A.; SCHICCHI, D. S.; MANKEL, C.; UKRAINCZYK, N.; KOENDERS, E. E. B. **A mesoscale approach for modeling capillary water absorption and transport phenomena in cementitious materials**. Computers & Structures. v. 200, p. 1-10, 2018.

CALLISTER, W. **Materials science and engineering: an introduction**. New York: John Wiley, 2000. 871 p.

CAMARA, L.; WONS, M.; ESTEVES, I.; MEDEIROS-JUNIOR, R. (2019). **Monitoring the Self-healing of Concrete from the Ultrasonic Pulse Velocity**. Journal of Composites Science. 3. 16. 10.3390/jcs3010016.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. **Caracterização reológica de argamassas pelo método de squeeze-flow**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 6., 2005, Florianópolis. Anais. Florianópolis: UFSC/ANTAC, 2005. p. 121-143.

CHIES, J.A. **Ensaio não destrutivo em concreto: detecção de falhas no interior de estruturas de concreto com o uso de ultrassom**. 2014. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. UFRGS. Porto Alegre.

CHILDS, P.; WONG, A.C. L.; GOWRIPALAN, N; PENG, G. D. **Measurement of the coefficient of thermal expansion of ultra-high strength cementitious composites using fiber optic sensors**. Cement and Concrete Research, Oxford, v. 37 p. 789-795, 2007.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. Boletim técnico n. 68.

CONTE, R. L. **Alvenaria com Blocos à Base de Cinzas Pesadas da Queima do Carvão Mineral: análise de desempenho**. 2014. 115 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2014.

CRESCENCIO, R. M.; BARROS, M. M. S. B. de. **A Influência Do Choque Térmico Na Resistência À Tração Do Revestimento Decorativo Monocamada**. IN: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 5., 2003, São Paulo. Anais... São Paulo: SBTA, 2003. p. 631-642.

CROWE, D.; FEINBERG, A. **“Concepts in accelerated testing” in design for reliability**. Electronics Handbook Series, ed. J.C. Whitaker. 2001, Boca Raton, USA.

D. HALLBERG. **Systemfor predictive life cyclemanagement of buildings and infrastructures**, Doctoral Thesis Centre for Build Environment, KTH Research School - HIG, University of Gävle, Sweden, 2009.

DANG, J.; ZHAO, J.; HU, W.; DU, Z.; GAO, D. **Properties of mortar with waste clay bricks as fine aggregate**. Construction and Building Materials. v. 166, p. 898-907, 2018.

DIRKX, I.; GRÉGOIRE, Y. **Evaluation of the durability of ETICS: additional requirements in Belgium**. In: CONGRESSO PORTUGUÊS DE ARGAMASSAS E ETICS, 4., 2012, COIMBRA, Anais... Coimbra: APFAC, 2012.

ELSEVIER. Pesquisa com o termo **“mortar durability”** em título, resumo ou palavra-chave. ScienceDirect, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/>>.

EMANUEL, J H.; HULSEY, J. L. **Prediction of the Thermal Coefficient of Expansion of Concrete**. Journal Proceedings, v. 74 – 4, p 149-155, 1977.

ESCOBAR, L.A.; MEEKER, W.Q. **A review of accelerated test models**, Statist. Sci. 21 (4) (2006) 552–577.

ESQUIVEL, J.F.T. **Avaliação da influência do choque térmico na aderência dos revestimentos de argamassa**. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

ESQUIVEL, J.F.T; BARROS, M.M.S.B. **Contribuição ao estudo do comportamento mecânico de argamassas cimentícias de revestimento após a ação do choque térmico**. Revista Engenharia e Tecnologia Aplicada. 38-47. 2018.

EUROPEAN ORGANISATION FOR TECHNICAL APPROVALS. **ETAG 004:** Guideline for European Technical Approval of External Thermal Insulation Composite Systems with Rendering. Brussels, 2000. Emenda de junho de 2008.

FERNANDES, T. S. **Contribuição aos ensaios de choque térmico em revestimentos aderidos de argamassa:** influência das dimensões e restrições de amostras. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

FERRÁNDIZ-MAS, V.; GARCÍA-ALCOCEL, E. **Durability of expanded polystyrene mortars**, Constr. Build. Mater. 46 (2013) 175–182.

FERREIRA, W.M.; NAHIME B.O.; REIS, I.C.; FELIPE, A.S.; SILVA, L.A. **Resistência à ação de calor e choque térmico de fachada com realce na norma de desempenho.** Gl. Sci Technol, Rio Verde, v.12, n.02, p.68-78, mai/ago. 2019.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de Argamassas e Revestimentos: estudos e procedimentos de execução.** São Paulo: Pini, 1994.

FONTENELLE, J. H. **Sistema de Fixação e Juntas em Vedações Verticais Constituídas por Placas Cimentícias:** estado da arte, desenvolvimento de um sistema e avaliação experimental. 2012. 219 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

FONTENELLE, J. H.; MITIDIERI, C. V. F. **Condição de contorno lateral dos corpos de prova submetidos ao ensaio de ação de calor e choque térmico.** In: Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído, 16.,2016, São Paulo. Anais... Porto Alegre: USP, 2016.

FONTENELLE, J. H.; MITIDIERI, C. V. F.; BRITO, A.C.; KANACIRO, C.; OLIVEIRA, L.A.; VITTORINO, F. **Proposta de Aprimoramento do Ensaio de Ação de Calor e Choque Térmico na NBR 15575.** p.127-168. Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras: Conforto Ambiental, Durabilidade e Pós-Ocupação. 2017.

FRANCIS, A. THOMAS, A. (2019). **Exploring the relationship between lean construction and environmental sustainability:** - A review of existing literature to decipher broader dimensions. Journal of Cleaner Production. 119913. 10.1016/j.jclepro.2019.119913.

FREITAS, A. S. S. L. A. **Avaliação do Comportamento Higrotérmico de Revestimentos Exteriores de Fachadas devido à Acção da Chuva Incidente.** Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011.

FREITAS, C. de. **Argamassas de Revestimento Com Agregados Miúdos de Britagem da Região Metropolitana de Curitiba:** propriedades no estado fresco e endurecido. Curitiba, 2010. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

GALLÉ, C. (2001) **Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry** - A comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying. *Cement and Concrete Research*, 31, 1467-1477.

GEYER, R. M. T. **Influência do Choque Térmico na Aderência de Azulejos ao Substrato**. 1994. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

GHABEZLOO, S. **Effect of porosity on the thermal expansion coefficient: a discussion of the paper 'Effects of mineral admixtures on the thermal expansion properties of hardened cement paste by Z.H. Shui, R. Zhang, W. Chen, D. Xuan, Constr Build Mater 24(9) (2010) 1761–1767. Constr. Build. Mater. 2010.**

GHABEZLOO, S. **Micromechanics analysis of thermal expansion and thermal pressurization of hardened cement paste**. *Cement and Concrete Research*, 2011.

GIONGO, M. **Análise do nível de exposição das edificações à chuva dirigida para Florianópolis**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 207, 107p.

GIONGO, M.; PADARATZ, I. J.; LAMBERTS, R. **Determinação da exposição à chuva dirigida em Florianópolis, SC: índices de chuva dirigida e métodos semi-empíricos**. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 11, n. 1, 2011, p. 7-23.

GOLDBERG, R. P. **Direct adhered ceramic tile, stone and thin brick facades**. Technical Design Manual. LATICRETE International, Inc. USA. 1998.

GOMES, A. O.; NEVES, C. M. M. **Proposta de Método de Dosagem Racional de Argamassas Contendo Argilominerais**. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 19-30, abr./jun. 2002.

GONÇALVES DA SILVA, M. **Influence of environmental aging on properties of polymeric mortars**, *J. Mater. Civ. Eng.* 16 (5) (2004) 461–468.

GRUBBS, F. **Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples**. *Technometrics*, 11(1), 1-21. 1969.

HALL, M.; ALLINSON, D. 2008a, **Assessing the Effects of Soil Grading on the Moisture Content-Dependent Thermal Conductivity of Stabilised Rammed Earth Materials**, *Applied Thermal Engineering*, 29, 740– 747.

HANNAWI, K.; PRINCE-AGBODJAN, W. **Transfer behaviour and durability of cementitious mortars containing polycarbonate plastic wastes**, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 19 (4) (2015) 467–481.

HASSELMAN, D. P. H. **Elastic Energy at Fracture and Surface Energy as Design Criteria for Thermal Shock.** Journal of The American Ceramic Society. v. 46, n. 11. p. 535-540. Nov. 1963.

HOSPODKA, M.; HOFKO, B.; BLANB, R. **Introducing a new specimen shape to assess the fatigue performance of asphalt mastic by dynamic shear rheometer testing.** Materials and Structures. p. 1-11, 2018.

IGNATIEV, N.; CHATTERJI, S. **On the mutual compatibility of mortar and concrete in composite members.** Cement & Concrete Composites, Essex, n. 14, p.179-783, 1992.

INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE (IEE). **Fontes de Biomassa.** São Paulo: USP, 2018. Disponível em: <<http://www.iee.usp.br/gbio/?q=livro/fontes-de-biomassa>>.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8.336:** Fibre-cement flat sheets — Product specification and test methods. 2009.

_____. **ISO 12.572:** Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties -- Cup method. 2016.

_____. **ISO 15.148:** Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water absorption coefficient by partial immersion. 2002.

INTERNATIONAL VOCABULARY OF METROLOGY (IVM). **Basic and general concepts and associated terms.** 3rd ed. Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil.** 2ª Edição. São Paulo: IBRACON, 2010.

ITIM, A.; EZZIANE, H.; KADRI, E.H. **Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions.** Construction and Building Materials, v. 25, p. 3603-3609, 2011.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída.** Curitiba: FUPEF, 2005.

JOHN, V. M. **Repensando o papel da cal hidratada nas argamassas.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, V., 2003, São Paulo. Anais... São Paulo: ANTAC, 2003. p. 47-63.

JOHN, V. M. **Repensando o papel da cal hidratada nas argamassas.** In: Simpósio Brasileiro De Tecnologia Das Argamassas, V., 2003, São Paulo. Anais... São Paulo: ANTAC, 2003. p. 47-63.

JOSHAGHANI, A.; BALAPOUR, M.; RAMEZANIANPOUR, A. **Effect of controlled environmental conditions on mechanical, microstructural and durability properties of cement mortar.** Construction and Building Materials. 164. 134-149. 2018.

JUENGER, M. C. G.; JENNINGS, H. M. **New insights into the effects of sugar on the hydration and microstructure of cement pastes**. Cement and Concrete research. v. 32, p. 393-399, 2002.

KAZMIERCZAK, C.; PIVA KULAKOWSKI, M.; BREHM, F.; SENTENA, J.; MARQUETTO, L. (2016). **Considerações sobre a Avaliação da Durabilidade de Revestimentos de Argamassa com Incorporação de Resíduos por Meio de Ensaio Acelerados com Ciclos Térmicos**. 10.5935/978-85-5953-005-6.2016C006.

KAZMIERCZAK, C.; SCHNEIDER, S.D.; AGUILERA, O.; ALBERT, C.C.; MANCIO, M. **Rendering mortars with crumb rubber**: Mechanical strength, thermal and fire properties and durability behaviour, Construction and Building Materials, Volume 253, 2020, 119002, ISSN 0950-0618. 2020.

KINGERY, W. D. **Factors affecting thermal stress resistance of ceramic materials**. Journal of the American Ceramic Society. v. 38, n. 1, p.3-15, 1955.
KINGERY, W.D. **Introduction to ceramics**. New. York: 1960. J. Wiley & Sons, Inc. 781 p.

KOU, S.C.; POON, C.S. **Mechanical properties of 5-year-old concrete prepared with recycled aggregates obtained from three different sources**. Magazine of Concrete Research 2008 60:1, 57-64.

KRESJSOVÁ, J.; DOLEZELOVÁ, M.; PERNICOVÁ, R.; SVORA, P.; VIMMROVÁ, A. **The influence of different aggregates on the behavior and properties of gypsum mortars**. Cement and Concrete Composites. v. 92, p. 188-197, 2018.

LOPES DA SILVA, S. H. **Desenvolvimento de formulações de argamassas autonivelantes para pisos e avaliação da retração por secagem**. Dissertação de Mestrado em Construção Civil – Universidade Federal do Paraná (UFPR). Curitiba, 2016.

LÓPEZ RUIZ, L.; ROCA, X.; GASSÓ, S. (2019). **The circular economy in the construction and demolition waste sector** – A review and an integrative model approach. Journal of Cleaner Production. 248. 119238.
10.1016/j.jclepro.2019.119238.

LORENZI, L.S. **Análise Crítica e Proposições de Avanço nas Metodologias de Ensaio Experimentais de Desempenho à Luz da ABNT NBR 15575 (2013) para Edificações Habitacionais de Interesse Social (HIS) Térreas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, RS. 2013.

LUZ, M. A. **Manifestações Patológicas Em Revestimentos Cerâmicos de Fachada em Três Estudos de Caso na Cidade de Balneário Camboriú**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

MAHAYUDDIN, A.; ZAHARUDDIN, W. **Quantification of Waste in Conventional Construction**, International Journal of Environment Science and Development, vol. 4, pp. 296-299, 2013.

MAIA, J.; RAMOS, N. M. M.; VEIGA, R. **A new durability assessment methodology of thermal mortars applied in multilayer rendering systems**. Construction and Building Materials, 222, 654–663. 2019.

MARSHALL, A. L. **The thermal properties of concrete**. Build. Sci, v. 7, p. 167-174, 1972.

MATTOS, A. D. **Como preparar orçamento de obras**. Ed.PINI. 1ªED. ISBN 85-7266-176-XX. 2006.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A. **Estudo da resistividade do concreto para proposta de modelagem de vida útil – Corrosão das armaduras devido à penetração de cloretos**. 2014. Tese (Doutorado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, São Paulo.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G. **Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement**. Construction and Building Materials, v. 107, p. 11-16, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon. 3ª ed. 2006.

MELO A. A. **Influência do teor de ativador e da idade de exposição na retração por secagem de argamassas com cimentos de escória ativada com silicato de sódio**. São Paulo, 2002. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

MELO JÚNIOR, C. M. **Influência da chuva dirigida e dos detalhes arquitetônicos na durabilidade de revestimentos de fachada**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2010, 204f.

MENDES, S.E.S.; OLIVEIRA, R.N.; CREMONEZ, C.; PEREIRA, E.; PEREIRA, E.; MEDEIROS-JUNIOR, R.A. **Electrical resistivity as a durability parameter for concrete design: Experimental data versus estimation by mathematical model**, Construction and Building Materials, Volume 192, 2018, Pages 610-620, ISSN 0950-0618.

MEYERS, S. L. **Thermal coefficient of expansion of Portland cement: long time tests**. Ind Eng Chem, 32, p. 1107-12, 1940.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES (MCTIC). **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. Brasília, 2016.

MIRANDA, L. F. R.; SELMO, S. M. S. **CDW recycled aggregate renderings: Part II – Analysis of the effect of materials finer than 75 μ m under accelerated aging performance.** Construction and Building Materials. 20, p. 625-633, 2006.

MOHAJERANI, A.; BURNETT, L.; SMITH, J.; MARKOVSKI, S.; RODWELL, G.; RAHMAN, M.T.; KURMUS, H.; MIRZABABAEI, M.; ARULRAJAH, A.; MAGHOOL, F. (2020). **Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review.** Resources Conservation and Recycling. 155. 10.1016/j.resconrec.2020.104679.

MORAES, F. R. **Sistema de Vedação Vertical Externo Composto Por Concreto e PVC Frente ao Ensaio De ação De Calor E Choque Térmico:** norma de desempenho NBR 15575/2013. 2015. 80 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2015.

MOSCOSO, Y. F. M.; BARBOSA, A. S.; UCHÔA, J. B.; BEZERRA, L. M.; SA, M. **Evaluation of resistance to fatigue due to thermal shock in ceramic facade coating system.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRACTURE, 13., 2013, Beijing. Anais... Beijing: ICF: 2013.

NAKAKURA, E.H. CINCOTTO, M.A. **Revisão de norma NBR 13581 como instrumento para melhor representar o desempenho de argamassas industrializadas em obra.** In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Brasília. 2001. Anais. P. 387-94.

NAYAKA, R.R.; ALENGARAM, U.J.; JUMAAT, M.H.; YUSOFF, S.B. **Microstructural investigation and durability performance of high volume industrial by-products-based masonry mortars,** Construction and Building Materials, Volume 189, 2018, Pages 906-923, ISSN 0950-0618.

NENEVÊ, B.L. **Desenvolvimento de formulações de argamassas autonivelantes para contrapiso e proposição de requisitos de desempenho.** Trabalho Final de Curso (TFC). Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Paraná (UFPR). Curitiba. 2017.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto.** Porto Alegre: Bookman, 2013. Tradução de CREMONI, R. A.

NEVILLE, A.M.; **Properties of concrete,** 2011.

OLIVEIRA, L. A.; FONTENELLE, J. H. MITIDIERI FILHO, C. V. **Durabilidade de fachadas:** métodos de ensaio para verificação da resistência à ação de calor e choque térmico. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p.53-67. out./dez. 2014.

PARAVISI, Sandra. **Avaliação de sistemas de produção de revestimento em fachada com aplicação mecânica e manual de argamassa.** 2007. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. UFRGS. Porto Alegre. 2007.

PCA – Portland Cement Association. **Building movements and joints**. Illinois PCA 1982.

PEDOTT, Alexandre Homs; FOGLIATTO, Flávio Sanson. **Estudos de repetitividade e reprodutividade para dados funcionais**. Prod., São Paulo, v.23, n. 3, p. 548-560, Sept. 2013.

POYASTRO, P. C. **Influência da volumetria e das condições de entorno da edificação no manchamento e infiltração de água em fachadas por ação de chuva dirigida**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2011.

QUARCIONI, V.A.; CINCOTTO, M.A.; **Influência da cal em propriedades mecânicas de argamassas**. VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas I International Symposium on Mortars Technology Florianópolis, 23 a 25 de maio de 2005.

RAGO, F.; CINCOTTO, M. A. **Influência do tipo da cal hidratada na reologia de pastas**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999. Boletim Técnico n. 233.

RANSOM, W. H. **Building Failures**: diagnosis and avoidance. Abingdon: ROUTLEDGE.1987.

ROMAN, L. M. F.; SAGAVE, A. ROMAN, H. R.; ALARCON, O. E. **Análise da resistência de aderência em sistemas de revestimento cerâmico submetidos a ciclos higrotérmicos**. ENTAC, 2000.

RORIZ, M. **Conforto e Desempenho Térmico de Edificações. Apostila de Conforto e Desempenho Térmico de Edificações**, curso de pós-graduação em Construção Civil da UFSCar, São Carlos, 2008.

SABBATINI, F. H. **Argamassas; notas de aula da disciplina Materiais de Construção Civil**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP, 1981.

SABBATINI, F. H; *et al.* **Conceitos básicos sobre a execução de revestimentos argamassados**. 1989.

SAHADE, Renato Freua. **Avaliação de sistemas de recuperação de fissuras em alvenaria de vedação**. 2005. 169 f. Dissertação (Mestrado em Habitação) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2005.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. Dissertação (Mestrado em estruturas e Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SANTOS, W. J. **Argamassa de Alto Desempenho**. Juiz de Fora, 2011. 209 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

SANTOS, W. J. **Desenvolvimento de metodologia de dosagem de argamassas de revestimento e assentamento**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Viçosa (UFV). 2014.

SANTOS, W. J.; *et al.* **Proposta de método de dosagem para argamassas de revestimento com areia artificial de britagem**. Ambiente construído. Porto Alegre. v. 18, n. 1, p. 225-243. 2018.

SARAIVA, A. G. **Contribuição ao estudo de tensões de natureza térmica em sistemas de revestimento cerâmico de fachada**. Brasília, 1998 (Dissertação – Mestrado) – Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília.

SCHULSON E. M.; SWAINSON I. P.; HOLDEN T. M. **Internal stress within hardened cement paste induced through thermal mismatch calcium hydroxide versus calcium silicate hydrate**. Cem Concr Res, 31, p. 1785-91, 2001.

SCRIVENER, K.L.; JOHN, V.M.; GARTNER, E.M. **Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry**, Cement and Concrete Research, Volume 114, 2018, Pages 2-26, ISSN 0008-8846.

SÉBAÏBI, Y.; DHEILLY, R. M.; QUÉNEUDEC, M. **Study of the water-retention capacity of a lime-sand mortar: Influence of the physicochemical characteristics of the lime**. Cement and Concrete Research, v. 33, p. 689 – 696, 2003.

SECRETARIA NACIONAL DA HABITAÇÃO PROGRAMA BRASILEIRO DA QUALIDADE E PRODUTIVIDADE DO HABITAT (PBQP-H). **Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (SINAT): Diretrizes para Avaliação Técnica de Produtos Nº 006. Rev.01 - Revestimento decorativo monocamada em argamassa inorgânica**. Brasília. 2016.

SELMO, S. M. S. et. al. **Propriedades e especificações de argamassas industrializadas de múltiplo uso**. São Paulo, EPUSP, 2002 (BT/PCC/310). 27 p.

SELMO, S. M. S.; HELENE, P. R. L. **Dosagem de Argamassa de Cimento Portland e Cal Para Revestimento Externo de Fachadas dos Edifícios**. São Paulo. Boletim Técnico - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1991.

SELMO, S.MS. **Dosagem de argamassas de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachada de edifícios**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da USP. São Paulo. 1989.

SENTENA, J. A. A. **Avaliação Da Durabilidade De Argamassas Com Adição De Filer De Arc Por Meio De Ciclos Térmicos**. 144 p. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos. 2015.

SHEN, W.; LIU, Y.; WANG, Z.; CAO, L.; U, D.; WANG, Y.; JI, X. **Influence of manufactured sand's characteristics on its concrete performance.** Construction and Building Materials. v. 172, p. 574-583, 2018.

SILVA, A.; GASPAR, P.; BRITO, J. (2014). **Durability of current renderings: A probabilistic analysis.** Automation in Construction. 44. 92–102. 10.1016/j.autcon.2014.04.002

SILVA, R.V.; BRITO, J DE.; DHIR, R.K. **Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete,** Journal of Cleaner Production, Volume 112, Part 4, 2016, Pages 2171-2186, ISSN 0959-6526.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Sustentabilidade Indicadores,** 2017.

TAMANNA, K.; RAMANA, S.N.; JAMIL M.; HAMID R. **Utilization of wood waste ash in construction technology:** A review. Construction and Building Materials. Volume 237, 20 March 2020, 117654

TEMOCHE, J. F.; BARROS, M. **Estudo do comportamento mecânico de argamassas de revestimento devido ao choque térmico.** In: CONGRESSO PORTUGUÊS DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO, 2010, 3. 2010, Lisboa. Anais... Lisboa: APFAC, 2010.

THOMAZ, E. **Trincas em edifícios:** causas, prevenção e recuperação. 1 ed. São Paulo: PINI/EPUSP/IPT, 1989.

TIMOSHENKO, S.; GOODIER, J.N. **Teoria de la elasticidad.** Bilbao, Urmo. 1968. 549 p.

VAN DEVENTER, J. S. J.; PROVIS, J. L.; DUXSON, P. **Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement.** Minerals Engineering, v. 29, p, 89-104, 2012.

VARISCO, M. Q. **Análise do desempenho de blocos de concreto celular autoclavado em um sistema de vedação externa.** 2014. 147 p. Dissertação (Mestrado) – Institutos de Tecnologia para o Desenvolvimento, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba, 2014.

VECCHIO, F. J.; SATO J. A. **Thermal Gradient Effects in Reinforced Concrete Frame Structures.** ACI Structural Journal. v. 87. 1990. p.262-275.

VILATÓ, R.R.; FRANCO, L. S. **Resistência à Penetração da Água de Chuva da Alvenaria Estrutural.** Boletim técnico.São Paulo: EPUSP, 2005.

VILLAS-BÔAS, B. T. **Utilização de cimento Portland e resíduos de Pinus spp para fabricação de blocos vazados de baixa densidade para alvenaria.** 192 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

WALKER, R.; PAVIA, S.; MITCHELL, R. **Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes.** Construction and Building Materials. v. 61, p. 340-348, 2014.

WANG, Z.; ZENG, Q.; WANG, L.; YAO, Y.; LI, K. (2013). **Characterizing blended cement pastes under cyclic freeze–thaw actions by electrical resistivity.** Construction and Building Materials. 44. 477–486. 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.042.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **Diretrizes para o Relatório e Monitoramento das Emissões na Indústria de Cimento.** Iniciativa para a Sustentabilidade do Cimento. Brasília, 2012.

ZENG, Q.; LI, K.; FEN-CHONG, T.; DANGLA, P. **Effect of porosity on thermal expansion coefficient of cement pastes and mortars,** Construction and Building Materials, Volume 28, Issue 1, 2012, Pages 468-475, ISSN 0950-0618.

ZENG, X.; CHEN, L.; ZHENG, K.; LING, C.; ZHU, H.; LIU, H.; WANG, P.; LI, K.; LIU, Z.; WANG, M. **Electrical resistivity and capillary absorption in mortar with styrene-acrylic emulsion and air-entrained agent: improvement and correlation with pore structure,** Construction and Building Materials, Volume 255, 2020, 119287, ISSN 0950-0618.

APÊNDICE 1

VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO VERTICAL EXTERNO EXPOSTAS À AÇÃO DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO – Método de ensaio

BRUNO LEANDRO NENEVÊ
eng.neneve@gmail.com



Universidade Federal do Paraná (UFPR). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGCEC).

Curitiba, 2020.

VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO VERTICAL EXTERNO EXPOSTAS À AÇÃO DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO – Método de ensaio

Origem: Dissertação de mestrado (APÊNDICE 1).
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa
Coorientador: Prof. Dr. Ronaldo Alves de Medeiros Junior

Este método foi baseado no Anexo E da NBR 15575-4 (ABNT, 2013).

Palavras-chave: Revestimento. Argamassa.
Durabilidade. Choque térmico.

4 Páginas

SUMÁRIO

1. Escopo
 2. Referências complementares
 3. Aparelhagem
 4. Corpos de prova
 5. Execução do ensaio
 6. Resultados
- ANEXO A**

1. Escopo

Este documento prescreve um método de verificação do comportamento de argamassas de revestimento vertical externo expostas à ação de calor e choque térmico, baseado no Anexo E da ABNT NBR 15575-4. O procedimento se aplica a argamassas industrializadas e a argamassas dosadas em obra ou laboratório.

O resultado deste ensaio é complementar ao procedimento de referência e permite avaliar o desempenho quanto à durabilidade de argamassas de revestimento vertical externo.

2. Referências complementares

- ABNT NBR 15575-1:** Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais.
ABNT NBR 15575-4: Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 4: Requisitos para os

sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE.

ABNT NBR 13.279:2005: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.

ABNT NBR 15630:2008: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica.

ABNT NBR 15259:2005: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.

ABNT NBR 15261:2005: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retratação ou expansão linear).

ABNT NBR 13281:2005: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos.

ABNT NBR 16648:2018: Argamassas inorgânicas decorativas para revestimento de edificações - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2018.

NENEVÊ, B.L. Proposta de ensaio para verificação do comportamento de argamassas de revestimento vertical externo expostas à ação de calor e choque térmico. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil

(PPGECC). Universidade Federal do Paraná (UFPR). 2020.

3. Aparelhagem

3.1. Estufa

Estufa com dimensões internas apropriadas para armazenar corpos de prova de argamassa, com capacidade para manter a temperatura de $(80\pm3)^{\circ}\text{C}$.

3.2. Reservatório

Apresenta-se em ANEXO A um modelo de projeto de reservatório. O mesmo é composto por um recipiente dotado de suportes e alimentação de água com controle de nível e vazão, vide especificado adiante.

3.2.1. Recipiente

Recipiente com dimensões internas apropriadas para armazenar corpos de prova de argamassa. O reservatório deve prever uma fonte de alimentação de água a $(20\pm3)^{\circ}\text{C}$, com capacidade constante de 3 L/min. O mesmo deve possuir, também, um sistema de controle de nível d'água constante – de modo que este seja mantido na altura de 1,5 cm a contar da base inferior do corpo de prova (ver ANEXO A).

3.2.2. Suportes

Bases que mantenham os corpos de prova afastados do fundo do recipiente e que permitam um contato efetivo entre a sua face inferior e a água. O topo (nível superior) dos suportes será considerado equivalente ao nível da base inferior do corpo de prova (ver ANEXO A).

3.3. Outros

Demais equipamentos solicitados pelas referências complementares, nos casos em que for aplicável. Ademais, é indispensável o uso de EPI's, para manuseio de material aquecido em estufa.

4. Corpos de prova

Para fins deste procedimento de ensaio, serão empregadas duas configurações de corpos de prova: dimensões $4\times4\times16\text{ cm}^3$ e $2,5\times2,5\times28,5\text{ cm}^3$.

Os de dimensões $4\times4\times16\text{ cm}^3$ devem ser moldados de acordo com a NBR 13.279; enquanto os de dimensões $2,5\times2,5\times28,5\text{ cm}^3$ devem ser moldados conforme a NBR 15261. A quantidade de corpos de prova deve atender ao mínimo exigido para os procedimentos de ensaio indicados no item 6.

Os corpos de prova moldados devem estar isentos de óleo ou outros materiais aderidos na moldagem.

5. Execução do ensaio

O procedimento deverá ser realizado aos 28 dias de idade dos corpos de prova. Contudo, em casos extraordinários, a idade de ensaio poderá ser alterada, mediante justificativa técnica.

O procedimento de ensaio consiste em submeter os corpos de prova a 10 ciclos de ação de calor e ação da água, consistindo cada ciclo em:

- ação do calor: aquecer o corpo de prova, acondicionando-o em estufa à 80°C , pelo período de 2 horas e 30 minutos;
- ação da água: imediatamente após completar o ciclo de aquecimento, resfriar, por meio de imersão parcial em reservatório, a face inferior do corpo de prova, pelo período de 30 minutos;
- transição entre ciclos: após finalizada a ação da água, o corpo de prova deverá ser acondicionado em ambiente com temperatura controlada a $(23\pm5)^{\circ}\text{C}$, mantendo-o por um intervalo de tempo aproximadamente equivalente a 21h 30 min, de modo que o ciclo subsequente inicie 24 h após o início do ciclo anterior.

Desse modo, será realizado 1 (um) ciclo por dia, totalizando 10 dias de ciclagem ao todo.

Após finalizada a ciclagem, com 42 dias de idade (mediante justificativa técnica, é tolerado realizar em idade distinta), os corpos de prova serão submetidos aos seguintes procedimentos de ensaio:

- “Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão” (ABNT NBR 13.279);
- “Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica” (ABNT NBR 15630);

VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO VERTICAL EXTERNO EXPOSTAS À AÇÃO DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO – Método de ensaio (NENEVÊ, 2020).

- “Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade” (ABNT NBR 15259);
- “Determinação da variação dimensional” (ABNT NBR 15261).

6 Resultados

Os resultados obtidos por meio dos procedimentos de ensaio realizados nas amostras deverão ser expressos conforme a respectiva referência normativa.

Finalmente, as argamassas deverão ser classificadas conforme requisitos de desempenho prescritos na ABNT NBR 13281 (vide resumo em Tabela I). Para o módulo de elasticidade dinâmico e variação dimensional, aplicar critério prescrito na ABNT NBR 16648 para avaliação da suscetibilidade à fissuração (conforme Tabela II). Destarte, deverá ser indicado – em relatório específico – a conformidade, ou não, da argamassa ensaiada com o respectivo requisito.

O relatório de ensaio deve apresentar, no mínimo, as seguintes informações:

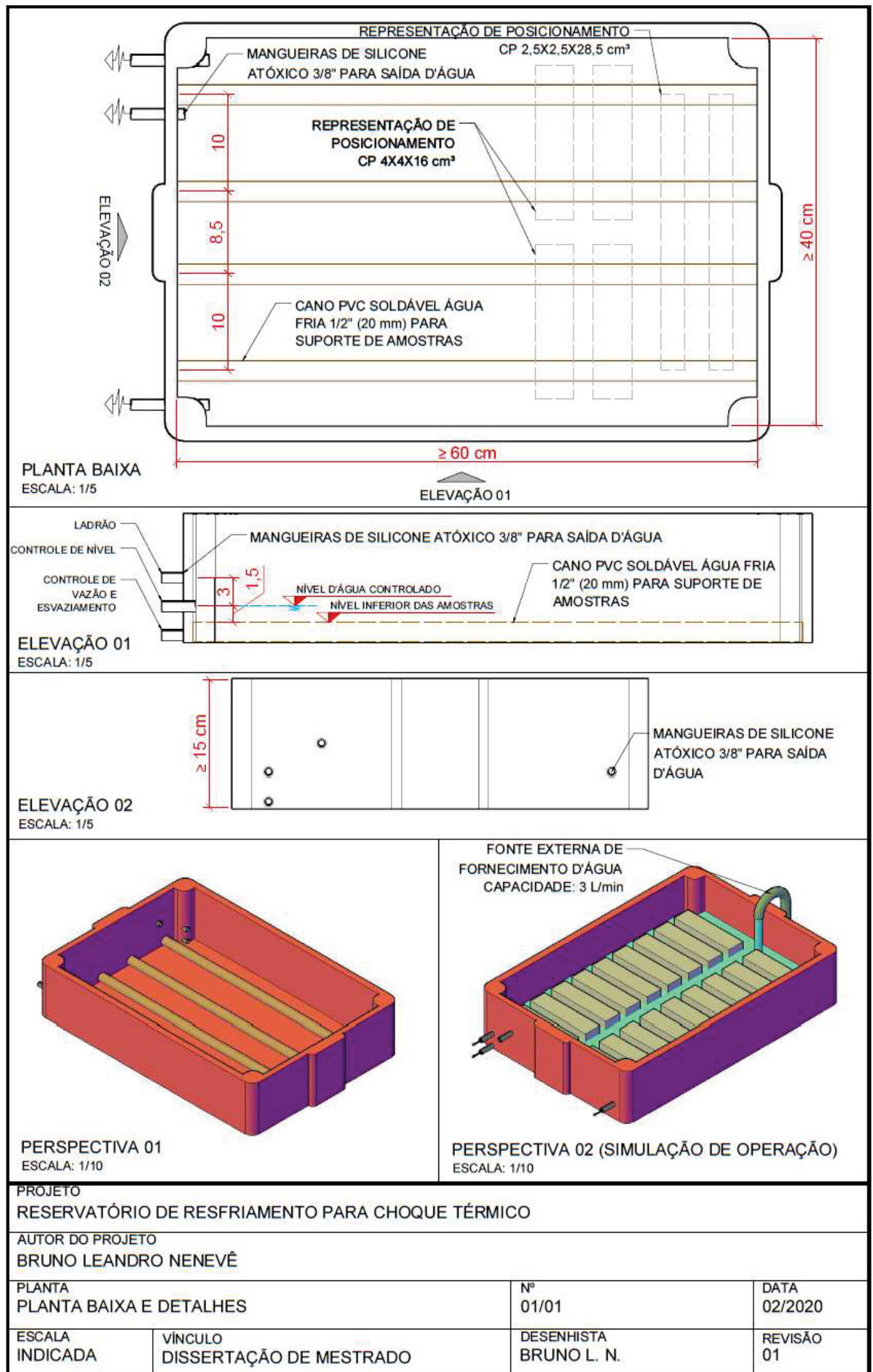
- Descrição das argamassas ensaiadas:
 - traço e insumos utilizados, para argamassas dosadas em laboratório ou em obra;
 - identificação do fornecedor, para argamassas industrializadas;
- Resultados de ensaios conforme:
 - ABNT NBR 13.279 – Resistência à tração na flexão e à compressão axial;
 - ABNT NBR 15630 – Módulo de elasticidade dinâmico;
 - ABNT NBR 15259 – Absorção por capilaridade e coeficiente de capilaridade;
 - ABNT NBR 15261 – Variação dimensional.
- Avaliação da conformidade ou não adequação a cada requisito ensaiado e respectivas classes de desempenho;
- Referência a este documento e aos demais indicados no item 2 (referências complementares).

Tabela I – Classes de desempenho das argamassas de revestimento (ABNT NBR 13281)

Propriedade		Classe de desempenho					
		1	2	3	4	5	6
R	Resistência à tração na flexão (MPa)	≤ 1,5	1,0 a 2,0	1,5 a 2,7	2,0 a 3,5	2,7 a 4,5	> 3,5
P	Resistência à compressão axial (MPa)	≤ 2,0	1,5 a 3,0	2,5 a 4,5	4,0 a 6,5	5,5 a 9,0	> 8,0
C	Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	≤ 1,5	1,0 a 2,5	2,0 a 4,0	3,0 a 7,0	5,0 a 12,0	> 10,0

Tabela II – Suscetibilidade à fissuração das argamassas de revestimento (ABNT NBR 16648)

Propriedade	Classificação da suscetibilidade à fissuração		
	Fraca	Média	Forte
Variação dimensional (mm/m)	≤ 0,7	0,7 a 1,2	> 1,2
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	≤ 7,0	7,0 a 12,0	> 12
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa) / Resistência à tração na flexão (MPa)	≤ 2,5	2,5 a 3,5	> 3,5



APÊNDICE 2

AVALIAÇÃO DA DILATAÇÃO TÉRMICA LINEAR PARA ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO – Método de ensaio

BRUNO LEANDRO NENEVÊ
eng.neneve@gmail.com



Universidade Federal do Paraná (UFPR). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC).

Curitiba, 2020.

VERIFICAÇÃO DA DILATAÇÃO TÉRMICA LINEAR EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO – Método de ensaio

Origem: Dissertação de mestrado (APÊNDICE 2).
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa
Coorientador: Prof. Dr. Ronaldo Alves de Medeiros Junior

Este método foi parcialmente baseado na NBR 12815 (ABNT, 2012).

Palavras-chave: Revestimento. Argamassa.
Durabilidade. Choque térmico.

4 Páginas

SUMÁRIO

1. Escopo
2. Referências complementares
3. Aparelhagem
4. Corpos de prova
5. Execução do ensaio
6. Resultados
7. Relatório de ensaio

1. Escopo

Este documento prescreve um método de verificação do comportamento de argamassas de revestimento quanto à dilatação térmica linear, baseado na ABNT NBR 12815 e demais conceitos termofísicos. O procedimento se aplica a argamassas industrializadas e a argamassas dosadas em obra ou laboratório. O presente documento altera a faixa de temperatura de ensaio, em relação ao ensaio de referência, para de 20 a 80°C, associando tal avaliação com o ensaio de verificação do comportamento quanto à exposição à ação de calor e choque térmico – conforme Anexo E da ABNT NBR 15575-4 ou APÊNDICE 1 (NENEVÊ, 2020 – dissertação de mestrado). O resultado deste ensaio permite avaliar o comportamento de variação dimensional de argamassas de revestimento quando submetidas à variação de temperatura.

2. Referências complementares

ABNT NBR 15575-1: Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais.

ABNT NBR 15575-4: Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE.

ABNT NBR 15261:2005: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retratação ou expansão linear).

ABNT NBR 12815: Concreto endurecido — Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

NENEVÊ, B.L. Proposta de ensaio para verificação do comportamento de argamassas de revestimento vertical externo expostas à ação de calor e choque térmico. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC). Universidade Federal do Paraná (UFPR). 2020.

3. Aparelhagem

3.1. Estufa

Estufa com dimensões internas apropriadas para armazenar corpos de prova de argamassa, com capacidade para manter a temperatura de 80°C.

3.2. Aparelho comparador

Prever o uso de aparelho (pórtico) com relógio comparador (resolução de 0,001 mm), vide estas e demais recomendações previstas na ABNT NBR 15261.

3.3. Termômetro digital a laser

Para aferição da temperatura superficial dos corpos de prova, utilizar um termômetro digital a laser (precisão de $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$), certificado por entidade competente.

3.4. Outros

Demais equipamentos solicitados pelas referências complementares, nos casos em que for aplicável. Ademais, é indispensável o uso de EPI's, para manuseio de material aquecido em estufa.

4. Corpos de prova

Para fins deste procedimento de ensaio, serão empregados corpos de prova de dimensões $2,5 \times 2,5 \times 28,5 \text{ cm}^3$, os quais deverão ser moldados conforme prescrições da ABNT NBR 15261.

A quantidade de amostras será composta minimamente de 3 (três) corpos de prova.

Os corpos de prova moldados devem estar isentos de óleo ou outros materiais aderidos na moldagem.

5. Execução do ensaio

O procedimento deverá ser realizado aos 28 dias de idade dos corpos de prova. Contudo, em casos extraordinários, a idade de ensaio poderá ser alterada, mediante justificativa técnica.

O procedimento de ensaio consiste em aferir a variação dimensional linear, resultante de uma variação de temperatura. A Figura I ilustra a execução do ensaio

5.1. Etapa 1 – Aquecimento prévio

A primeira etapa de ensaio consiste em aquecer previamente os corpos de prova em estufa ajustada à temperatura de 80°C . As amostras deverão permanecer acondicionadas nesta condição por 48h.

5.2. Etapa 2 – Leituras

Após completar a primeira etapa de ensaio, os corpos de prova serão retirados da estufa e, então, serão imediatamente conduzidos ao aparelho comparador (conforme requisitos indicados em item 4.2). Este momento será definido como “instante zero”.

O ambiente de ensaio deverá possuir temperatura controlada de $(23 \pm 3)^{\circ}\text{C}$.

Com o aparelho previamente calibrado com barra padrão, serão realizadas – sequencialmente após a Etapa 01 – 9 (nove) leituras de variação dimensional e de temperatura, sendo esta última aferida no centro da superfície externa do corpo de prova (com uma única leitura) pelo termômetro digital a laser (indicado em item 4.3).

As 9 (nove) leituras deverão ser realizadas conforme Tabela I.

Tabela I – Instantes de leituras de ensaio

Instante (min)	Leitura de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) [T_n]	Leitura dimensional (mm) [L_n]
0	T_0	L_0
1	T_1	L_1
2	T_2	L_2
3	T_3	L_3
4	T_4	L_4
5	T_5	L_5
10	T_{10}	L_{10}
20	T_{20}	L_{20}
30	T_{30}	L_{30}

6 Resultados

6.1. Gráfico de comportamento

Após a aferição das leituras prescritas no item 6.2, os dados obtidos deverão ser plotados em gráfico de dispersão, tal que o eixo das abscissas (x) corresponde à variação de temperatura em relação à menor temperatura aferida para cada amostra. Analogamente, o eixo das ordenadas (y) equivale à variação dimensional específica (em mm/mm) em relação à medida aferida no instante final de ensaio (L_{30}), que conceitualmente corresponde à menor leitura e calculada da seguinte forma:

$$\varepsilon_n = \frac{L_n - L_{30}}{L_{30} + 285}$$

Onde:

ε_n : Variação dimensional (deformação) específica no instante n;

L_n : leitura de variação dimensional no instante n (mm);

L_{30} : leitura de variação dimensional no instante 30 minutos (mm);

285: comprimento (em mm) teórico inicial do corpo de prova.

Deste modo, o primeiro ponto plotado para cada amostra será (0;0), com variação dimensional e de temperatura nulos, tal qual é definido conceitualmente, tal que não há variação dimensional decorrente de um gradiente nulo.

Após criação deste gráfico, será possível observar o comportamento do material ensaiado. Ademais, por meio de regressão linear, é possível determinar o coeficiente angular da equação obtida, tal que este será equivalente ao coeficiente de dilatação térmica. O resultado de ensaio (coeficiente angular da equação obtida por regressão) deverá ser expresso em notação científica, com precisão de 2 casas decimais.

A Figura II representa um exemplo de gráfico de dispersão obtido pela plotagem das leituras aferidas com a respectiva equação de regressão linear determinada.

6.2. Coeficiente de dilatação térmica linear

Além da verificação instruída em item 7.1, também é possível recorrer à equação termofísica, tal que:

$$\alpha = \frac{L_0 - L_{30}}{(L_{30} + 285) \cdot (T_0 - T_{30})}$$

Onde:

α : coeficiente de dilatação linear ($^{\circ}\text{C}^{-1}$);

L_0 : leitura de variação dimensional no instante zero (mm);

L_{30} : leitura de variação dimensional no instante 30 minutos (mm);

T_0 : leitura de temperatura no instante zero ($^{\circ}\text{C}$);

T_{30} : leitura de temperatura no instante 30 minutos ($^{\circ}\text{C}$);

285: comprimento (em mm) teórico inicial do corpo de prova.

Destarte, em posse da equação apresentada, é possível calcular o coeficiente de dilatação térmica linear entre dois pontos quaisquer.

Para fins de expressão de resultado padrão, estipula-se calcular o coeficiente entre os pontos extremos de temperatura obtidas (instante zero e instante 8 [leitura aos 30 minutos]).

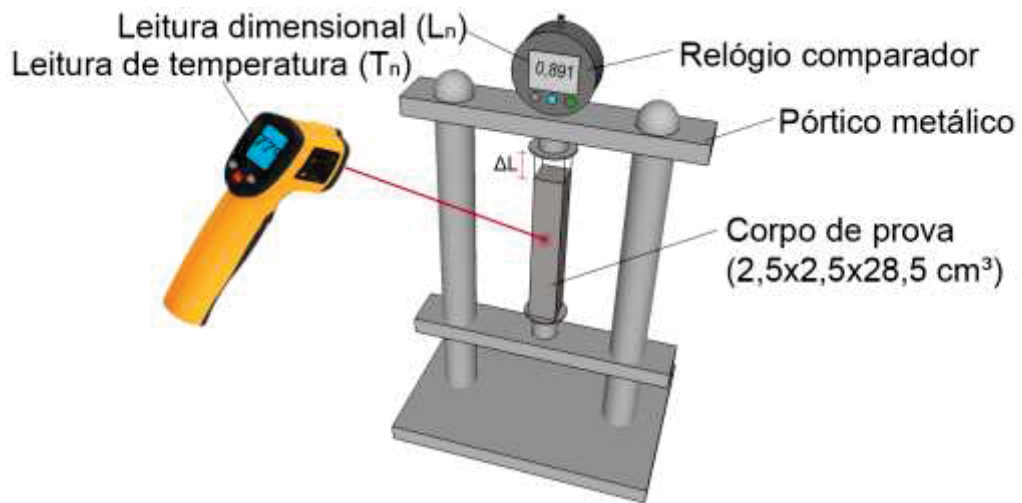
O resultado deverá ser expresso em notação científica, com precisão de 2 casas decimais.

7 Relatório de ensaio

Deve indicar, no mínimo, os seguintes dados e informações:

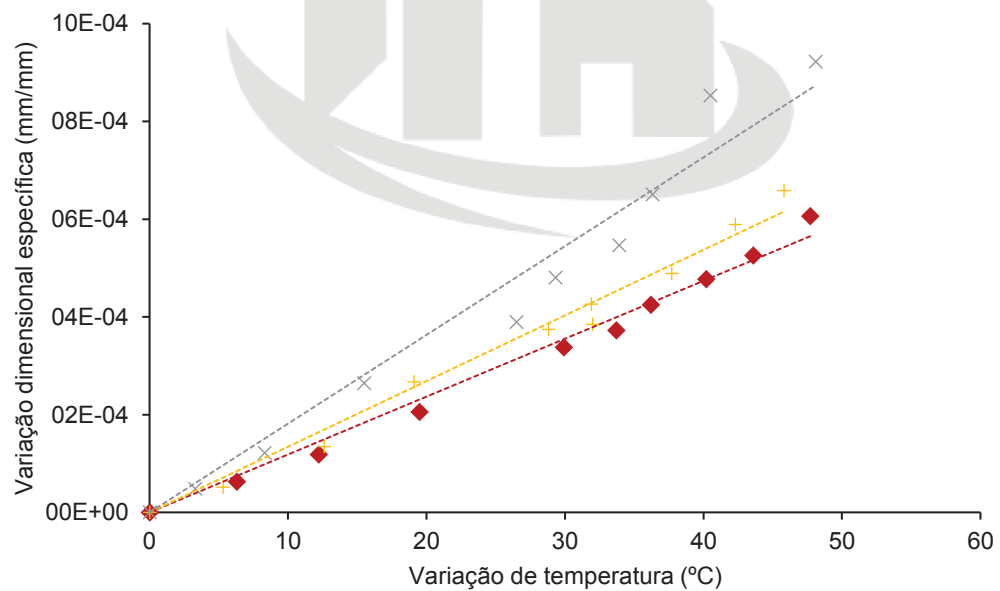
- a) Característica do material submetido a ensaio;
- b) Marca comercial do produto e fabricante (se for o caso);
- c) Relação água/materiais secos, em massa;
- d) Gráfico de comportamento de dilatação térmica linear, vide 6.1;
- e) Valor do coeficiente de dilatação térmica linear, calculado conforme 6.2.

Figura I – Ilustração de execução do procedimento de ensaio e aferição das leituras.



Fonte: NENEVÊ (2020).

Figura II – Exemplo de gráfico de comportamento quanto à dilatação térmica linear com três curvas de distintas argamassas



Fonte: NENEVÊ (2020).

APÊNDICE 3

ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA – Comparativo de custos

TABELA 30 – ORÇAMENTO PARA EXECUÇÃO DO PROCEDIMENTO DE ENSAIO DE AÇÃO DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO DA NBR 15575-4 (ABNT, 2013)

Item	Referência	Serviço	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Custo total
1	Cotação COT.1	ENSAIO DE VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE SVVE EXPOSTO À AÇÃO DE CALOR CHOQUE TÉRMICO (ANEXO E, ABNT NBR 15575-4/2013) COM EMISSÃO DE RELATÓRIO TÉCNICO	und.	2,00	R\$ 3.509,00	R\$ 7.018,00
2	SINAPI (01/2020)	ALVENARIA DE VEDAÇÃO DE BLOCOS CERÂMICOS FURADOS NA HORIZONTAL DE 14X9X19CM (ESPESSURA 14CM, BLOCO DEITADO) DE PAREDES COM ÁREA LÍQUIDA MENOR QUE 6M² SEM VÃOS E ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO COM PREPARO EM BETONEIRA. AF_06/2014	m²	5,76	R\$ 128,60	R\$ 740,74
3	SINAPI (01/2020)	CHAPISCO APLICADO EM ALVENARIA (SEM PRESENÇA DE VÃOS) E ESTRUTURAS DE CONCRETO DE FACHADA, COM ROLO PARA TEXTURA ACRÍLICA. ARGAMASSA INDUSTRIALIZADA COM PREPARO MANUAL. AF_06/2014	m²	11,52	R\$ 9,16	R\$ 105,52
2	SINAPI (01/2020)	EMBOÇO OU MASSA ÚNICA EM ARGAMASSA TRAÇO 1:2:8, PREPARO MANUAL, APLICADA MANUALMENTE EM PANOS CEGOS DE FACHADA (SEM PRESENÇA DE VÃOS), ESPESSURA DE 25 MM. AF_06/2014	m²	11,52	R\$ 31,73	R\$ 365,53
3	SINAPI (01/2020)	DEMOLIÇÃO DE ALVENARIA DE BLOCO FURADO, DE FORMA MANUAL, SEM REAPROVEITAMENTO. AF_12/2017	m³	1,15	R\$ 50,09	R\$ 57,70
4	SINAPI (01/2020)	TRANSPORTE COM CAMINHÃO BASCULANTE DE 6 M3, EM VIA URBANA PAVIMENTADA, DMT ATÉ 30 KM (UNIDADE: M3XKM). AF_01/2018	m³.km	34,56	R\$ 1,19	R\$ 41,13
FONTE: O autor (2020).					PREÇO TOTAL	R\$ 8.328,62

TABELA 31 – ORÇAMENTO PARA EXECUÇÃO DO PROCEDIMENTO DE ENSAIO DE AÇÃO DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO PROPOSTO PARA ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

Item	Referência	Serviço	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Custo total
1	SINAPI (01/2020)	371 (adaptado) CORPO DE PROVA DE ARGAMASSA 2,5X2,5X28,5 cm³	und.	9,00	R\$ 0,18	R\$ 1,63
2	SINAPI (01/2020)	371 (adaptado) CORPO DE PROVA DE ARGAMASSA 4X4X16 cm³	und.	3,00	R\$ 0,12	R\$ 0,37
4	ORSE (09/2019)	8978 ÁGUA - CONSUMO EM VOLUME	m³	0,06	R\$ 3,77	R\$ 0,23
3	Cotação	COT.2 CAIXA PLÁSTICA PEAD 42 LITROS	und.	1,00	R\$ 34,99	R\$ 34,99
3	Cotação	COT.3 MANGUEIRA SILICONE ATÓXICO 3/8"	m	2,00	R\$ 13,33	R\$ 26,66
5	Cotação	COT.4 MANGUEIRA FLEXÍVEL PARA JARDIM COM ADAPTADOR	m	1,00	R\$ 1,90	R\$ 1,90
6	Cotação	COT.5 TERMÔMETRO DIGITAL LASER (INFRAVERMELHO)	und.	1,00	R\$ 79,05	R\$ 79,05
FONTE: O autor (2020).						PREÇO TOTAL R\$ 144,82

APÊNDICE 4

RESULTADOS GERAIS E ANÁLISE ESTATÍSTICA: ANOVA E TESTE DE TUKEY

1. DENSIDADE DE MASSA APARENTE NO ESTADO ENDURECIDO

g/cm ³	28 dias	42 dias (Sem ciclagem)	42 dias (Com ciclagem)
I-A	1,15	1,14	1,15
	1,17	1,16	1,16
	1,16	1,11	1,17
	1,15	1,12	1,15
I-B	1,56	1,57	1,56
	1,52	1,58	1,60
	1,52	1,58	1,59
	1,54	1,55	1,60
I-C	1,23	1,17	1,21
	1,16	1,15	1,20
	1,22	1,31	1,18
	1,21	1,32	1,23
S-C	1,75	1,71	1,76
	1,73	1,75	1,77
	1,73	1,74	1,75
	1,72	1,78	1,75
M-1	1,96	1,93	1,95
	1,93	1,94	1,95
	1,87	1,88	1,87
	1,91	1,85	1,91
M-2	1,80	1,81	1,82
	1,77	1,80	1,82
	1,80	1,80	1,83
	1,78	1,83	1,84

RESUMO	28 dias	42 dias (Sem ciclagem)	42 dias (Com ciclagem)	Total
<i>I-A</i>				
Contagem	4,000	4,000	4,000	12,000
Soma	4,632	4,531	4,642	13,805
Média	1,158	1,133	1,161	1,150
Variância	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>I-B</i>				
Contagem	4,000	4,000	4,000	12,000
Soma	6,131	6,281	6,345	18,757
Média	1,533	1,570	1,586	1,563
Variância	0,000	0,000	0,000	0,001
<i>I-C</i>				
Contagem	4,000	4,000	4,000	12,000
Soma	4,822	4,948	4,830	14,599
Média	1,205	1,237	1,207	1,217
Variância	0,001	0,008	0,000	0,003
<i>S-C</i>				
Contagem	4,000	4,000	4,000	12,000
Soma	6,931	6,985	7,031	20,948
Média	1,733	1,746	1,758	1,746
Variância	0,000	0,001	0,000	0,000
<i>M-1</i>				
Contagem	4,000	4,000	4,000	12,000
Soma	7,666	7,604	7,678	22,949
Média	1,917	1,901	1,920	1,912
Variância	0,001	0,002	0,002	0,001
<i>M-2</i>				
Contagem	4,000	4,000	4,000	12,000
Soma	7,158	7,231	7,300	21,689
Média	1,789	1,808	1,825	1,807
Variância	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>Total</i>				
Contagem	24,000	24,000	24,000	
Soma	37,340	37,580	37,827	
Média	1,556	1,566	1,576	
Variância	0,087	0,088	0,091	

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Formulação de argamassa	6,064	5,000	1,213	1238,426	0,000	2,386
Idade e condição de exposição	0,005	2,000	0,002	2,519	0,090	3,168
Interações	0,010	10,000	0,001	1,025	0,436	2,011
Erro aleatório	0,053	54,000	0,001			
Total	6,131	71,000				

TESTE TUKEY: I-A (DENSIDADE)
-----DMS: 0,0298068504300031 NMS: 0,05
-----Média harmonica do número de repetições (r): 4
Erro padrão: 0,00687184270936274

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 SC	1.132500	a1
42 CC	1.157500	a1
28	1.157500	a1

TESTE TUKEY: I-B (DENSIDADE)
-----DMS: 0,04643052603746 NMS: 0,05
-----Média harmonica do número de repetições (r): 4
Erro padrão: 0,010704360482221

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
28	1.535000	a1
42 SC	1.570000	a1 a2
42 CC	1.587500	a2

TESTE TUKEY: I-C (DENSIDADE)
-----DMS: 0,112634451089539 NMS: 0,05
-----Média harmonica do número de repetições (r): 4
Erro padrão: 0,0259673940848048

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
-------------	--------	---------------------

42 CC	1.205000 a1
28	1.205000 a1
42 SC	1.237500 a1

TESTE TUKEY: M-1 (DENSIDADE)

DMS: 0,0413711201424005 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 4
 Erro padrão: 0,00953793595188295

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 SC	1.900000 a1	
28	1.917500 a1	
42 CC	1.920000 a1	

TESTE TUKEY: M-2 (DENSIDADE)

DMS: 0,0268066767063434 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 4
 Erro padrão: 0,00618016540591305

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
28	1.787500 a1	
42 SC	1.810000 a1 a2	
42 CC	1.827500 a2	

TESTE TUKEY: S-C (DENSIDADE)

DMS: 0,0480892789296967 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 4
 Erro padrão: 0,0110867789130417

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
28	1.732500 a1	
42 SC	1.745000 a1	
42 CC	1.757500 a1	

2. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

	28 dias	42 dias (Sem ciclagem)	42 dias (Com ciclagem)
I-A	26,4%	24,6%	28,9%
	26,1%	24,1%	28,3%
	24,1%	21,8%	26,8%
I-B	16,4%	15,9%	17,5%
	16,7%	16,4%	18,4%
	17,2%	16,6%	18,8%
I-C	21,4%	20,2%	23,6%
	22,8%	21,4%	24,7%
	22,9%	21,4%	24,7%
S-C	12,2%	11,6%	12,7%
	11,7%	11,2%	12,2%
	12,1%	11,7%	12,3%
M-1	14,0%	13,4%	15,4%
	13,9%	13,2%	15,1%
	13,6%	13,0%	15,0%
M-2	14,8%	14,2%	15,5%
	14,8%	14,5%	15,4%
	14,8%	14,4%	15,0%

RESUMO	28 dias	42 dias (Sem ciclagem)	42 dias (Com ciclagem)	Total
<i>I-A</i>				
Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	0,766	0,706	0,840	2,312
Média	0,255	0,235	0,280	0,257
Variância	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>I-B</i>				
Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	0,503	0,489	0,548	1,540
Média	0,168	0,163	0,183	0,171
Variância	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>I-C</i>				
Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	0,670	0,629	0,730	2,029
Média	0,223	0,210	0,243	0,225
Variância	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>S-C</i>				
Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	0,360	0,345	0,373	1,078
Média	0,120	0,115	0,124	0,120
Variância	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>M-1</i>				
Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	0,415	0,396	0,456	1,267
Média	0,138	0,132	0,152	0,141
Variância	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>M-2</i>				
Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	0,445	0,431	0,459	1,334
Média	0,148	0,144	0,153	0,148
Variância	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>Total</i>				
Contagem	18,000	18,000	18,000	
Soma	3,158	2,996	3,405	
Média	0,175	0,166	0,189	
Variância	0,002	0,002	0,003	

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	0,128	5,000	0,026	609,950	0,000	2,477
Colunas	0,005	2,000	0,002	56,328	0,000	3,259
Interações	0,002	10,000	0,000	3,668	0,002	2,106
Dentro	0,002	36,000	0,000			
Total	0,135	53,000				

TESTE TUKEY: I-A (ABSORÇÃO POR IMERSÃO)

DMS: 0,668198131116132 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 3
 Erro padrão: 0,132637070959037

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 SC	23.500000	a1
28	25.533333	a2
42 CC	28.000000	a3

TESTE TUKEY: I-B (ABSORÇÃO POR IMERSÃO)

DMS: 0,556948991335242 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 3
 Erro padrão: 0,110554159678513

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 SC	16.300000	a1
28	16.766667	a1
42 CC	18.233333	a2

TESTE TUKEY: I-C (ABSORÇÃO POR IMERSÃO)

DMS: 0,314161600906098 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 3
 Erro padrão: 0,0623609564462322

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 SC	21.000000	a1

28	22.366667	a2
42 CC	24.333333	a3

TESTE TUKEY: M-1 (ABSORÇÃO POR IMERSÃO)

DMS: 0,167926439238719 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 3
 Erro padrão: 0,0333333333333334

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 SC	13.200000	a1
28	13.833333	a2
42 CC	15.166667	a3

TESTE TUKEY: M-2 (ABSORÇÃO POR IMERSÃO)

DMS: 0,552713576321511 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 3
 Erro padrão: 0,109713431434064

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 SC	14.366667	a1
28	14.800000	a1 a2
42 CC	15.300000	a2

TESTE TUKEY: S-C (ABSORÇÃO POR IMERSÃO)

DMS: 0,393822408548158 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 3
 Erro padrão: 0,0781735959970568

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 SC	11.500000	a1
28	12.000000	a2
42 CC	12.400000	a3

3. ÍNDICE DE VAZIOS

	28 dias	42 dias (Sem ciclagem)	42 dias (Com ciclagem)
I-A	33,8%	32,0%	35,3%
	31,9%	30,0%	33,2%
	30,6%	28,3%	32,1%
I-B	24,9%	24,5%	25,7%
	25,4%	25,1%	26,8%
	25,9%	25,4%	27,1%
I-C	27,8%	26,7%	29,3%
	29,2%	27,9%	30,1%
	29,0%	27,4%	29,9%
S-C	21,0%	20,2%	22,0%
	20,3%	19,6%	21,1%
	21,1%	20,5%	21,4%
M-1	24,5%	23,5%	26,0%
	24,4%	23,4%	25,5%
	23,9%	23,0%	25,5%
M-2	25,1%	24,2%	26,2%
	25,1%	24,4%	25,8%
	25,0%	24,5%	25,5%

RESUMO 28 dias 42 dias (Sem ciclagem) 42 dias (Com ciclagem) Total

I-A

Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	0,963	0,903	1,006	2,873
Média	0,321	0,301	0,335	0,319
Variância	0,000	0,000	0,000	0,000

I-B

Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	0,763	0,750	0,797	2,309
Média	0,254	0,250	0,266	0,257
Variância	0,000	0,000	0,000	0,000

I-C

Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	0,859	0,820	0,894	2,573
Média	0,286	0,273	0,298	0,286
Variância	0,000	0,000	0,000	0,000

S-C

Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	0,624	0,603	0,644	1,871
Média	0,208	0,201	0,215	0,208
Variância	0,000	0,000	0,000	0,000

M-1

Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	0,728	0,700	0,770	2,197
Média	0,243	0,233	0,257	0,244
Variância	0,000	0,000	0,000	0,000

M-2

Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	0,751	0,730	0,774	2,256
Média	0,250	0,243	0,258	0,251
Variância	0,000	0,000	0,000	0,000

Total

Contagem	18,000	18,000	18,000
Soma	4,688	4,506	4,885
Média	0,260	0,250	0,271
Variância	0,001	0,001	0,002

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	0,065082819	5	0,013016564	197,0678649	4,258E-25	2,4771687
Colunas	0,00398631	2	0,001993155	30,1759193	2,014E-08	3,2594463
Interações	0,000526928	10	5,26928E-05	0,797757732	0,631473	2,1060539
Dentro	0,002377842	36	6,60512E-05			
Total	0,0719739	53				

TESTE TUKEY: I-A (ÍNDICE DE VAZIOS)-----
DMS: 0,513023745997219 NMS: 0,05
-----Média harmonica do número de repetições (r): 3
Erro padrão: 0,101835015443463

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 SC	30.100000	a1
28	32.100000	a2
42 CC	33.533333	a3

TESTE TUKEY: I-B (ÍNDICE DE VAZIOS)-----
DMS: 0,678666624289708 NMS: 0,05
-----Média harmonica do número de repetições (r): 3
Erro padrão: 0,134715062810913

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 SC	24.900000	a1
28	25.400000	a1
42 CC	26.533333	a2

TESTE TUKEY: I-C (ÍNDICE DE VAZIOS)-----
DMS: 0,565324634124331 NMS: 0,05
-----Média harmonica do número de repetições (r): 3
Erro padrão: 0,112216721537356

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 SC	27.333333	a1
28	28.666667	a2
42 CC	29.766667	a3

TESTE TUKEY: M-1 (ÍNDICE DE VAZIOS)

DMS: 0,42260560451896 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 3
Erro padrão: 0,083887049280786

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 SC	23.300000	a1
28	24.266667	a2
42 CC	25.666667	a3

TESTE TUKEY: M-2 (ÍNDICE DE VAZIOS)

DMS: 0,738367289301857 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 3
Erro padrão: 0,146565621758588

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 SC	24.366667	a1
28	25.066667	a1
42 CC	25.833333	a2

TESTE TUKEY: S-C (ÍNDICE DE VAZIOS)

DMS: 0,702486695546199 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 3
Erro padrão: 0,13944333775568

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 SC	20.100000	a1
28	20.800000	a1 a2
42 CC	21.500000	a2

4. COEFICIENTE DE CAPILARIDADE

$\text{g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$	28 dias	42 dias (Sem ciclagem)	42 dias (Com ciclagem)
I-A	3,0	3,1	3,7
	2,2	3,1	3,4
	3,1	1,9	3,6
I-B	6,2	6,3	7,1
	6,9	6,5	7,3
	6,4	6,0	7,1
I-C	4,3	3,5	4,5
	4,5	4,2	4,9
	4,9	3,3	4,8
M-1	5,8	5,1	6,6
	5,5	4,9	6,8
	5,6	5,8	6,2
M-2	19,5	18,8	19,9
	19,3	18,2	19,9
	18,4	18,7	19,2
S-C	8,2	7,7	10,8
	9,5	7,8	10,6
	8,4	8,7	9,8

RESUMO	28 dias	42 dias (Sem ciclagem)	42 dias (Com ciclagem)	Total
<i>I-A</i>				
Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	8,330	8,100	10,700	27,130
Média	2,777	2,700	3,567	3,014
Variância	0,243	0,480	0,023	0,359
<i>I-B</i>				
Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	19,500	18,800	21,500	59,800
Média	6,500	6,267	7,167	6,644
Variância	0,130	0,063	0,013	0,215
<i>I-C</i>				
Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	13,700	11,000	14,200	38,900
Média	4,567	3,667	4,733	4,322
Variância	0,093	0,223	0,043	0,337
<i>M-1</i>				
Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	16,840	15,830	19,600	52,270
Média	5,613	5,277	6,533	5,808
Variância	0,029	0,223	0,093	0,404
<i>M-2</i>				
Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	57,200	55,700	59,000	171,900
Média	19,067	18,567	19,667	19,100
Variância	0,343	0,103	0,163	0,380
<i>S-C</i>				
Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	26,100	24,200	31,140	81,440
Média	8,700	8,067	10,380	9,049
Variância	0,490	0,303	0,280	1,340
<i>Total</i>				
Contagem	18,000	18,000	18,000	
Soma	141,670	133,630	156,140	
Média	7,871	7,424	8,674	
Variância	30,135	29,627	30,464	

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	1524,012348	5	304,8024696	1641,681381	2,103E-41	2,4771687
Colunas	14,45782593	2	7,228912963	38,93528761	9,955E-10	3,2594463
Interações	3,141685185	10	0,314168519	1,69212739	0,1207075	2,1060539
Dentro	6,683933333	36	0,185664815			
Total	1548,295793	53				

TESTE TUKEY: I-A (COEFICIENTE DE CAPILARIDADE)-----
DMS: 1,59161431511731 NMS: 0,05
-----Média harmonica do número de repetições (r): 3
Erro padrão: 0,315934826846954

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 SC	2.700000	a1
28	2.766667	a1
42 CC	3.566667	a1

TESTE TUKEY: I-B (COEFICIENTE DE CAPILARIDADE)-----
DMS: 0,499092896622787 NMS: 0,05
-----Média harmonica do número de repetições (r): 3
Erro padrão: 0,0990697472229278

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 SC	6.266667	a1
28	6.500000	a1
42 CC	7.166667	a2

TESTE TUKEY: I-C (COEFICIENTE DE CAPILARIDADE)-----
DMS: 0,96222484656592 NMS: 0,05
-----Média harmonica do número de repetições (r): 3
Erro padrão: 0,191001260418568

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 SC	3.666667	a1
28	4.566667	a1 a2
42 CC	4.733333	a2

TESTE TUKEY: M-1 (COEFICIENTE DE CAPILARIDADE)

DMS: 1,17348424756156 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 3
Erro padrão: 0,232936169924851

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 SC	5.266667	a1
28	5.633333	a1 a2
42 CC	6.533333	a2

TESTE TUKEY: M-2 (COEFICIENTE DE CAPILARIDADE)

DMS: 1,13893252380823 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 3
Erro padrão: 0,226077666104176

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 SC	18.566667	a1
28	19.066667	a1
42 CC	19.666667	a1

TESTE TUKEY: S-C (COEFICIENTE DE CAPILARIDADE)

DMS: 1,98929641389959 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 3
Erro padrão: 0,394874569864819

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 SC	8.066667	a1
28	8.700000	a1 a2
42 CC	10.400000	a2

5. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

MPa	28 dias	42 dias (Sem ciclagem)	42 dias (Com ciclagem)
I-A	1,10	1,24	0,87
	1,15	1,35	0,78
	1,05	1,48	0,88
I-B	1,63	2,22	1,49
	1,71	1,91	1,23
	1,60	1,72	1,42
I-C	1,83	1,98	0,77
	1,57	1,99	0,98
	1,12	2,00	0,91
S-C	0,34	0,38	0,34
	0,30	0,54	0,34
	0,24	0,44	0,33
M-1	4,11	4,43	3,18
	4,24	4,09	3,27
	4,15	4,08	2,91
M-2	1,03	0,87	0,86
	0,77	0,99	1,03
	0,83	1,15	0,95

RESUMO	28 dias	42 dias (Sem ciclagem)	42 dias (Com ciclagem)	Total
<i>I-A</i>				
Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	3,300	4,070	2,530	9,900
Média	1,100	1,357	0,843	1,100
Variância	0,002	0,014	0,003	0,054
<i>I-B</i>				
Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	4,940	5,850	4,140	14,930
Média	1,647	1,950	1,380	1,659
Variância	0,003	0,064	0,018	0,082
<i>I-C</i>				
Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	4,520	5,970	2,660	13,150
Média	1,507	1,990	0,887	1,461
Variância	0,129	0,000	0,011	0,265
<i>S-C</i>				
Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	0,880	1,360	1,010	3,250
Média	0,293	0,453	0,337	0,361
Variância	0,003	0,007	0,000	0,007
<i>M-1</i>				
Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	12,500	12,600	9,360	34,460
Média	4,167	4,200	3,120	3,829
Variância	0,004	0,040	0,035	0,303
<i>M-2</i>				
Contagem	3,000	3,000	3,000	9,000
Soma	2,630	3,010	2,840	8,480
Média	0,877	1,003	0,947	0,942
Variância	0,019	0,020	0,007	0,014
<i>Total</i>				
Contagem	18,000	18,000	18,000	
Soma	28,770	32,860	22,540	
Média	1,598	1,826	1,252	
Variância	1,621	1,510	0,845	

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Formulações de argamassa	64,78189815	5	12,956	614,694	8,73E-34	2,477
Idades e exposições	3,000803704	2	1,500	71,184	3,09E-13	3,259
Interações	2,046107407	10	0,205	9,707	1,35E-07	2,106
Erro aleatório	0,7588	36	0,021			
Total	70,58760926	53				

TESTE TUKEY: I-A (RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO)
-----DMS: 0,264450820964088 NMS: 0,05
-----Média harmonica do número de repetições (r): 3
Erro padrão: 0,0524933858267454

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 CC	0.843333	a1
28	1.100000	a1 a2
42 SC	1.356667	a2

TESTE TUKEY: I-B (RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO)
-----DMS: 0,464562760501482 NMS: 0,05
-----Média harmonica do número de repetições (r): 3
Erro padrão: 0,0922155285388731

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 CC	1.380000	a1
28	1.646667	a1 a2
42 SC	1.950000	a2

TESTE TUKEY: I-C (RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO)
-----DMS: 0,679704605968326 NMS: 0,05
-----Média harmonica do número de repetições (r): 3
Erro padrão: 0,134921101773235

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 CC	0.886667	a1
28	1.506667	a1 a2
42 SC	1.990000	a2

TESTE TUKEY: M-1 (RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO)

DMS: 0,450541764936229 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 3
Erro padrão: 0,089432366334276

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 CC	3.120000	a1
28	4.166667	a2
42 SC	4.200000	a2

TESTE TUKEY: M-2 (RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO)

DMS: 0,425266316665766 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 3
Erro padrão: 0,0844151996143226

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
28	0.876667	a1
42 CC	0.946667	a1
42 SC	1.003333	a1

TESTE TUKEY: S-C (RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO)

DMS: 0,166521172363973 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 3
Erro padrão: 0,03305438840143

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
28	0.293333	a1
42 CC	0.336667	a1
42 SC	0.453333	a1

6. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

MPa	28 dias	42 dias (Sem ciclagem)	42 dias (Com ciclagem)
I-A	1,66	3,24	1,47
	2,21	2,98	1,62
	2,30	2,64	1,33
	2,10	2,70	1,63
	2,24	2,80	1,60
	2,30	3,50	1,50
I-B	4,51	4,34	2,83
	4,36	4,26	3,08
	4,53	4,29	3,09
	4,25	4,74	3,74
	4,35	4,77	3,76
	4,38	4,87	3,14
I-C	3,37	4,72	2,12
	3,68	3,32	2,74
	3,78	4,12	2,27
	2,54	4,56	2,28
	3,92	4,68	2,05
	3,46	3,56	2,09
S-C	0,66	0,91	0,60
	0,61	0,94	0,65
	0,57	1,04	0,67
	0,36	0,93	0,72
	0,63	0,95	0,62
	0,54	1,03	0,65
M-1	16,31	18,38	13,15
	16,64	17,89	14,65
	16,36	17,53	13,37
	17,60	18,21	13,67
	16,78	17,79	13,76
	16,56	17,43	14,43
M-2	3,22	3,06	2,47
	2,96	3,23	2,82
	2,82	3,31	2,75
	3,01	2,88	3,11
	3,16	2,93	2,48
	2,77	3,16	2,79

RESUMO	28 dias	42 dias (Sem ciclagem)	42 dias (Com ciclagem)	Total
<i>I-A</i>				
Contagem	6,000	6,000	6,000	18,000
Soma	12,810	17,860	9,150	39,820
Média	2,135	2,977	1,525	2,212
Variância	0,060	0,113	0,013	0,430
<i>I-B</i>				
Contagem	6,000	6,000	6,000	18,000
Soma	26,380	27,270	19,640	73,290
Média	4,397	4,545	3,273	4,072
Variância	0,011	0,077	0,148	0,411
<i>I-C</i>				
Contagem	6,000	6,000	6,000	18,000
Soma	20,750	24,960	13,550	59,260
Média	3,458	4,160	2,258	3,292
Variância	0,243	0,362	0,065	0,850
<i>S-C</i>				
Contagem	6,000	6,000	6,000	18,000
Soma	3,370	5,800	3,910	13,080
Média	0,562	0,967	0,652	0,727
Variância	0,012	0,003	0,002	0,037
<i>M-1</i>				
Contagem	6,000	6,000	6,000	18,000
Soma	100,250	107,230	83,030	290,510
Média	16,708	17,872	13,838	16,139
Variância	0,221	0,138	0,347	3,250
<i>M-2</i>				
Contagem	6,000	6,000	6,000	18,000
Soma	17,940	18,570	16,420	52,930
Média	2,990	3,095	2,737	2,941
Variância	0,032	0,029	0,057	0,059
<i>Total</i>				
Contagem	36	36	36	
Soma	181,5	201,69	145,7	
Média	5,041666667	5,6025	4,047222222	
Variância	29,52774571	32,40109929	20,53729492	

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Formulação de argamassa	2845,375749	5	569,075	5298,514	1,61E-109	2,316
Idade e condição de exposição	44,66811296	2	22,334	207,947	1,81E-34	3,098
Interações	31,27289815	10	3,127	29,117	4,57E-24	1,938
Erro aleatório	9,66625	90	0,107			
Total	2930,98301	107				

TESTE TUKEY: I-A (RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL)
-----DMS: 0,416035252596077 NMS: 0,05
-----Média harmonica do número de repetições (r): 6
Erro padrão: 0,107252730259645

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 CC	1.525000	a1
28	2.135000	a2
42 SC	2.976667	a3

TESTE TUKEY: I-B (RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL)
-----DMS: 0,424206460425774 NMS: 0,05
-----Média harmonica do número de repetições (r): 6
Erro padrão: 0,109359244897011

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 CC	3.273333	a1
28	4.396667	a2
42 SC	4.545000	a2

TESTE TUKEY: I-C (RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL)
-----DMS: 0,838281124685289 NMS: 0,05
-----Média harmonica do número de repetições (r): 6
Erro padrão: 0,216106540939966

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 CC	2.258333	a1
28	3.458333	a2
42 SC	4.160000	a2

TESTE TUKEY: M-1 (RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL)

DMS: 0,776550276004619 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 6
Erro padrão: 0,200192499952014

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 CC	13.838333	a1
28	16.708333	a2
42 SC	17.871667	a3

TESTE TUKEY: M-2 (RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL)

DMS: 0,369431808460627 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 6
Erro padrão: 0,0952384920626654

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 CC	2.736667	a1
28	2.990000	a1
42 SC	3.096667	a1

TESTE TUKEY: S-C (RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL)

DMS: 0,13029882056182 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 6
Erro padrão: 0,0335906733087227

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
28	0.561667	a1
42 CC	0.651667	a1
42 SC	0.966667	a2

7. MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

GPa	28 dias	42 dias (Sem ciclagem)	42 dias (Com ciclagem)
I-A	4,35	4,23	2,87
	4,45	4,20	2,81
	4,37	4,33	2,77
	4,36	4,10	2,74
I-B	7,10	7,14	6,49
	7,10	7,14	6,32
	7,10	7,14	6,27
	6,89	7,21	6,49
I-C	4,99	5,11	3,52
	4,99	5,28	3,94
	4,89	4,92	3,64
	4,79	4,92	3,67
S-C	4,71	4,56	3,62
	4,72	4,44	3,61
	4,55	4,66	3,49
	4,33	4,92	3,30
M-1	11,20	11,21	7,56
	11,20	11,05	8,27
	11,31	11,00	7,49
	11,09	10,75	7,83
M-2	6,33	6,45	5,82
	6,38	6,64	5,67
	6,37	6,47	5,65
	6,38	6,31	5,98

RESUMO	28 dias	42 dias (Sem ciclagem)	42 dias (Com ciclagem)	Total
<i>I-A</i>				
Contagem	4,000	4,000	4,000	12,000
Soma	17,534	16,868	11,190	45,593
Média	4,384	4,217	2,798	3,799
Variância	0,002	0,009	0,003	0,557
<i>I-B</i>				
Contagem	4,000	4,000	4,000	12,000
Soma	28,178	28,635	25,570	82,383
Média	7,045	7,159	6,393	6,865
Variância	0,010	0,001	0,013	0,131
<i>I-C</i>				
Contagem	4,000	4,000	4,000	12,000
Soma	19,652	20,236	14,770	54,658
Média	4,913	5,059	3,693	4,555
Variância	0,009	0,030	0,031	0,429
<i>S-C</i>				
Contagem	4,000	4,000	4,000	12,000
Soma	18,304	18,587	14,020	50,910
Média	4,576	4,647	3,505	4,243
Variância	0,034	0,042	0,022	0,324
<i>M-1</i>				
Contagem	4,000	4,000	4,000	12,000
Soma	44,793	44,007	31,150	119,950
Média	11,198	11,002	7,788	9,996
Variância	0,008	0,037	0,125	2,713
<i>M-2</i>				
Contagem	4,000	4,000	4,000	12,000
Soma	25,458	25,875	23,120	74,453
Média	6,365	6,469	5,780	6,204
Variância	0,001	0,018	0,024	0,112
<i>Total</i>				
Contagem	24,000	24,000	24,000	
Soma	153,920	154,207	119,820	
Média	6,413	6,425	4,993	
Variância	5,755	5,477	3,352	

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra	321,096	5	64,219	2756,283	1,04E-63	2,386
Colunas	32,574	2	16,287	699,037	2,52E-39	3,168
Interações	13,088	10	1,309	56,175	6,38E-25	2,011
Dentro	1,258	54	0,023			
Total	368,016	71				

TESTE TUKEY: I-A (MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO)DMS: 0,141893647023857 NMS: 0,05
-----Média harmonica do número de repetições (r): 4
Erro padrão: 0,0327129773773176

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 CC	2.797500	a1
42 SC	4.215000	a2
28	4.382500	a3

TESTE TUKEY: I-B (MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO)DMS: 0,229406840105788 NMS: 0,05
-----Média harmonica do número de repetições (r): 4
Erro padrão: 0,0528887721754082

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 CC	6.392500	a1
28	7.047500	a2
42 SC	7.157500	a2

TESTE TUKEY: I-C (MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO)DMS: 0,233723141848587 NMS: 0,05
-----Média harmonica do número de repetições (r): 4
Erro padrão: 0,0538838772010907

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 CC	3.692500	a1
28	4.915000	a2
42 SC	5.057500	a2

TESTE TUKEY: M-1 (MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO)

DMS: 0,537265530407734 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 4
Erro padrão: 0,12386428505066

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 CC	7.787500	a1
42 SC	11.002500	a2
28	11.200000	a2

TESTE TUKEY: M-2 (MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO)

DMS: 0,305450716704179 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 4
Erro padrão: 0,07042036479441

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 CC	5.780000	a1
28	6.365000	a2
42 SC	6.467500	a2

TESTE TUKEY: S-C (MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO)

DMS: 0,461185339891367 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 4
Erro padrão: 0,106324320412176

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 CC	3.505000	a1
28	4.577500	a2
42 SC	4.645000	a2

8. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL (RES)

**Valores sem aplicação do fator de correção (0,172)*

Ωm	28 dias	42 dias (Sem ciclagem)	42 dias (Com ciclagem)
I-A	33,70	36,20	24,90
	34,70	39,40	29,70
	38,20	42,80	20,50
	32,80	36,50	20,50
I-B	14,40	19,10	21,00
	17,50	20,30	19,80
	17,90	22,30	18,50
	20,20	24,60	19,40
I-C	17,30	22,00	16,60
	17,10	20,60	20,40
	17,20	22,20	18,90
	18,10	21,60	17,00
S-C	14,40	15,70	12,60
	11,90	13,80	10,10
	11,30	13,90	10,80
	13,40	15,10	11,50
M-1	10,10	13,30	7,80
	10,60	12,20	11,70
	11,50	13,10	9,30
	10,80	14,60	8,80
M-2	12,80	13,10	10,10
	11,00	12,50	10,80
	11,10	12,40	11,50
	13,00	13,50	9,30

**Valores sem aplicação do fator de correção (0,172)*

RESUMO	28 dias	42 dias (Sem ciclagem)	42 dias (Com ciclagem)	Total
<i>I-A</i>				
Contagem	4,000	4,000	4,000	12,000
Soma	139,400	154,900	95,600	389,900
Média	34,850	38,725	23,900	32,492
Variância	5,590	9,462	19,253	52,350
<i>I-B</i>				
Contagem	4,000	4,000	4,000	12,000
Soma	70,000	86,300	78,700	235,000
Média	17,500	21,575	19,675	19,583
Variância	5,687	5,809	1,076	6,452
<i>I-C</i>				
Contagem	4,000	4,000	4,000	12,000
Soma	69,700	86,400	72,900	229,000
Média	17,425	21,600	18,225	19,083
Variância	0,209	0,507	3,109	4,614
<i>S-C</i>				
Contagem	4,000	4,000	4,000	12,000
Soma	51,000	58,500	45,000	154,500
Média	12,750	14,625	11,250	12,875
Variância	1,990	0,862	1,137	3,168
<i>M-1</i>				
Contagem	4,000	4,000	4,000	12,000
Soma	43,000	53,200	37,600	133,800
Média	10,750	13,300	9,400	11,150
Variância	0,337	0,980	2,740	3,959
<i>M-2</i>				
Contagem	4,000	4,000	4,000	12,000
Soma	47,900	51,500	41,700	141,100
Média	11,975	12,875	10,425	11,758
Variância	1,149	0,269	0,889	1,746
<i>Total</i>				
Contagem	24,000	24,000	24,000	
Soma	421,000	490,800	371,500	
Média	17,542	20,450	15,479	
Variância	71,459	85,637	34,364	

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	3907,785694	5	781,5571	230,4125	4,00E-35	2,3861
Colunas	299,3719444	2	149,6860	44,1292	4,38E-12	3,1682
Interações	312,6447222	10	31,2645	9,2171	1,14E-08	2,0112
Dentro	183,1675	54	3,3920			
Total	4702,969861	71				

TESTE TUKEY: I-A (RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL)
-----DMS: 6,9806936975535 NMS: 0,05
-----Média harmonica do número de repetições (r): 4
Erro padrão: 1,60936926913758

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 CC	23.900000	a1
28	34.850000	a2
42 SC	38.725000	a2

TESTE TUKEY: I-B (RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL)
-----DMS: 4,09122295616274 NMS: 0,05
-----Média harmonica do número de repetições (r): 4
Erro padrão: 0,943214067843444

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
28	17.500000	a1
42 CC	19.675000	a1
42 SC	21.575000	a1

TESTE TUKEY: I-C (RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL)
-----DMS: 2,81359839909897 NMS: 0,05
-----Média harmonica do número de repetições (r): 4
Erro padrão: 0,648663155180629

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
28	17.400000	a1
42 CC	18.225000	a1
42 SC	21.600000	a2

TESTE TUKEY: M-1 (RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL)

DMS: 2,78019792339364 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 4
Erro padrão: 0,640962817434314

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 CC	9.400000	a1
28	10.750000	a1 a2
42 SC	13.300000	a2

TESTE TUKEY: M-2 (RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL)

DMS: 2,22467521876934 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 4
Erro padrão: 0,512889418447637

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 CC	10.425000	a1
28	11.975000	a1 a2
42 SC	12.875000	a2

TESTE TUKEY: S-C (RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL)

DMS: 0,813889810982338 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 4
Erro padrão: 0,187638837486628

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
42 CC	11.250000	a1
28	12.750000	a2
42 SC	14.625000	a3

9. VARIAÇÃO DIMENSIONAL

[mm]		VARIAÇÃO DIMENSIONAL DAS INDUSTRIALIZADAS																		SEM CICLAGEM					
		2 dias (desmoldagem)			7 dias			14 dias			21 dias			28 dias			35 dias			42 dias					
Amostra		L ₀		L ₁		L ₂		L ₃		L ₄		L ₅		L ₆		L ₇		L ₈		L ₉		L ₁₀			
I-A	A7	5,940	5,940	5,940	5,707	5,707	5,702	5,702	5,693	5,693	5,686	5,686	5,686	5,690	5,691	5,690	5,681	5,681	5,681	5,681	5,681	5,681	5,681		
	A8	8,487	8,490	8,490	8,250	8,250	8,203	8,204	8,186	8,197	8,196	8,145	8,143	8,140	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	A9	4,768	4,769	4,766	4,565	4,565	4,558	4,557	4,547	4,545	4,536	4,535	4,536	4,540	4,540	4,540	4,532	4,532	4,532	4,532	4,532	4,532			
	A10	4,568	4,566	4,565	4,346	4,346	4,335	4,335	4,318	4,317	4,310	4,310	4,310	4,310	4,310	4,311	4,311	4,301	4,301	4,301	4,301	4,301			
	A11	3,032	3,034	3,035	2,625	2,623	2,623	2,558	2,557	2,475	2,472	2,462	2,462	2,460	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
I-B	B7	7,085	7,085	7,082	6,920	6,920	6,918	6,918	6,899	6,899	6,896	6,896	6,896	6,894	6,894	6,894	6,887	6,887	6,887	6,887	6,887	6,887	6,887		
	B8	6,800	6,807	6,796	6,525	6,523	6,517	6,515	6,506	6,505	6,502	6,498	6,497	6,497	6,491	6,491	6,491	6,487	6,487	6,487	6,487	6,487			
	B9	5,393	5,390	5,390	5,229	5,229	5,230	5,229	5,211	5,211	5,208	5,208	5,208	5,204	5,204	5,204	5,198	5,198	5,198	5,197	5,197	5,198			
	B10	4,659	4,663	4,659	4,503	4,502	4,501	4,500	4,487	4,487	4,487	4,483	4,483	4,482	4,483	4,480	4,480	4,474	4,474	4,474	4,474	4,474			
	B11	4,877	4,876	4,875	4,711	4,711	4,715	4,715	4,703	4,702	4,701	4,696	4,696	4,696	4,695	4,695	4,695	4,692	4,692	4,692	4,692	4,692			
I-C	B12	3,331	3,333	3,333	3,168	3,168	3,168	3,168	3,158	3,158	3,149	3,150	3,149	3,152	3,152	3,152	3,145	3,145	3,145	3,149	3,146	3,146			
	C7	5,104	5,105	5,097	4,865	4,865	4,848	4,849	4,832	4,832	4,831	4,828	4,828	4,825	4,827	4,825	4,821	4,821	4,821	4,821	4,821	4,821			
	C8	5,724	5,721	5,715	5,498	5,498	5,488	5,487	5,470	5,471	5,469	5,467	5,466	5,466	5,464	5,464	5,454	5,454	5,454	5,453	5,453	5,453			
	C9	7,128	7,134	7,132	6,909	6,909	6,900	6,900	6,887	6,885	6,887	6,881	6,881	6,881	6,880	6,880	6,880	6,873	6,873	6,873	6,872	6,872			
	C10	4,509	4,514	4,514	4,281	4,280	4,268	4,267	4,253	4,252	4,252	4,247	4,247	4,247	4,245	4,245	4,245	4,237	4,237	4,237	4,237	4,237			
	C11	6,495	6,492	6,490	6,293	6,292	6,269	6,270	6,250	6,250	6,249	6,247	6,248	6,248	6,245	6,245	6,236	6,236	6,235	6,235	6,235	6,235			

[mm]		VARIAÇÃO DIMENSIONAL DAS TRADICIONAIS												SEM CICLAGEM							
		2 dias (desmoldagem)		7 dias		14 dias		21 dias		28 dias		35 dias		42 dias							
Amostra	L ₀	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆														
S-C	S1	-	-	3,798	3,780	3,725	3,621	3,592	3,574	3,520	3,507	3,501	3,491	3,487	3,484	3,455	3,455	3,453	3,449	3,450	3,451
	S2	-	-	3,584	3,589	3,574	3,510	3,523	3,503	3,340	3,336	3,330	3,317	3,315	3,321	3,272	3,272	3,265	3,261	3,257	3,256
	S3	-	-	2,885	2,855	2,849	2,728	2,725	2,723	2,561	2,557	2,552	2,545	2,543	2,536	2,482	2,471	2,466	2,460	2,450	2,452
	S4	-	-	0,716	0,724	0,702	0,626	0,618	0,623	0,429	0,423	0,418	0,369	0,364	0,361	0,338	0,340	0,349	0,330	0,310	0,305
	S5	-	-	1,169	1,170	1,172	1,144	1,117	1,121	0,922	0,916	0,929	0,970	0,961	0,959	0,871	0,872	0,869	0,867	0,861	0,861
	S6	-	-	2,536	2,546	2,512	2,341	2,358	2,337	2,217	2,218	2,215	2,215	2,208	2,208	2,197	2,199	2,194	2,170	2,171	2,172
	S7	-	-	2,710	2,707	2,720	2,607	2,618	2,600	2,502	2,492	2,502	2,249	2,449	2,445	2,444	2,441	2,439	2,427	2,427	2,425
	S8	-	-	2,046	1,999	1,960	1,863	1,848	1,843	1,752	1,752	1,750	1,681	1,680	1,680	1,681	1,680	1,675	1,671	1,669	1,667
M-1	M1-1	2,649	2,650	2,660	2,525	2,519	2,288	2,285	2,285	2,246	2,239	2,237	2,206	2,207	2,205	2,199	2,199	2,199	2,198	2,198	2,198
	M1-2	5,152	5,154	5,160	5,078	5,063	5,061	4,787	4,791	4,788	4,739	4,729	4,677	4,676	4,680	4,671	4,671	4,671	4,646	4,646	4,645
	M1-3	4,315	4,310	4,304	4,231	4,222	4,231	3,954	3,953	3,921	3,921	3,909	3,885	3,885	3,879	3,863	3,863	3,863	3,861	3,861	3,861
	M1-4	5,202	5,197	5,198	5,059	5,054	5,057	4,834	4,831	4,830	4,732	4,723	4,666	4,666	4,665	4,656	4,656	4,656	4,640	4,640	4,640
	M1-5	3,291	3,295	3,285	3,137	3,127	3,121	2,905	2,901	2,845	2,845	2,853	2,822	2,820	2,820	2,819	2,818	2,817	2,815	2,812	2,815
	M1-6	3,629	3,628	3,625	3,474	3,472	3,480	3,274	3,271	3,238	3,238	3,237	3,223	3,222	3,222	3,215	3,214	3,214	3,191	3,190	3,191
	M1-7	5,785	5,784	5,782	5,624	5,631	5,623	5,417	5,417	5,365	5,365	5,358	5,239	5,239	5,238	5,227	5,228	5,227	5,216	5,214	5,218
	M1-8	4,875	4,874	4,880	4,714	4,708	4,701	4,507	4,508	4,480	4,447	4,483	4,321	4,320	4,320	4,310	4,308	4,308	4,287	4,287	4,287
	M1-9	4,057	4,058	4,052	3,848	3,839	3,835	3,715	3,711	3,683	3,680	3,674	3,634	3,634	3,633	3,629	3,629	3,629	3,628	3,626	3,626
M-2	M2-1	0,771	0,765	0,753	0,510	0,506	0,502	0,488	0,466	0,449	0,445	0,442	0,429	0,426	0,427	0,421	0,423	0,420	0,400	0,401	0,399
	M2-2	1,522	1,535	1,531	1,147	1,142	1,140	1,073	1,072	1,049	1,046	1,043	0,995	0,995	0,995	0,995	0,994	0,994	0,995	0,994	0,994
	M2-3	1,700	1,691	1,680	1,370	1,375	1,368	1,293	1,291	1,268	1,265	1,265	1,257	1,257	1,256	1,255	1,256	1,255	1,254	1,225	1,254
	M2-4	5,512	5,514	5,482	5,193	5,180	5,183	5,115	5,113	5,072	5,072	5,068	4,955	4,953	4,955	4,951	4,953	4,952	4,952	4,958	4,956
	M2-5	0,623	0,613	0,600	0,296	0,293	0,290	0,227	0,219	0,200	0,195	0,190	0,176	0,177	0,178	0,171	0,175	0,171	0,171	0,171	0,171
	M2-6	2,690	2,676	2,666	2,403	2,396	2,393	2,335	2,334	2,292	2,283	2,290	2,215	2,221	2,219	2,213	2,214	2,214	2,214	2,215	2,214
	M2-7	3,344	3,345	3,341	3,048	3,048	3,051	2,983	2,984	2,983	2,942	2,937	2,822	2,824	2,821	2,821	2,821	2,821	2,820	2,822	2,820
	M2-8	2,004	2,001	1,981	1,729	1,728	1,721	1,662	1,662	1,614	1,613	1,612	1,567	1,567	1,567	1,565	1,565	1,565	1,565	1,565	1,566

[mm]		VARIAÇÃO DIMENSIONAL DAS INDUSTRIALIZADAS												COM CICLAGEM					
		2 dias		7 dias		14 dias		21 dias		28 dias		35 dias		42 dias					
Amostra		L ₀		L ₁		L ₂		L ₃		L ₄		L ₅		L ₆					
I-A	A1	1,669	1,669	1,577	1,574	1,659	1,632	1,577	1,574	1,564	1,520	1,509	1,507	1,217	1,215	1,164	1,164	1,163	
	A2	2,455	2,456	2,411	2,410	2,465	2,415	2,400	2,378	2,371	2,291	2,290	2,289	1,946	1,941	1,883	1,878	1,880	
	A3	7,103	7,109	6,899	6,903	6,913	6,925	6,910	6,905	6,898	6,886	6,880	6,822	6,352	6,349	6,151	6,156	6,150	
I-B	B2	5,663	5,663	5,455	5,453	5,423	5,406	5,401	5,388	5,394	5,378	5,378	5,378	5,191	5,189	5,168	5,166	5,168	
	B3	2,672	2,673	2,737	2,733	2,504	2,491	2,494	2,463	2,459	2,455	2,452	2,453	2,241	2,239	2,214	2,214	2,214	
	B4	5,194	5,186	5,204	5,203	5,257	5,230	5,214	4,971	4,973	4,981	4,980	4,981	4,789	4,789	4,768	4,768	4,767	
	B5	4,713	4,707	4,707	4,701	4,698	4,547	4,534	4,491	4,492	4,484	4,485	4,479	4,267	4,267	4,249	4,249	4,249	
I-C	C1	5,901	5,900	5,822	5,811	5,801	5,796	5,793	5,627	5,627	5,633	5,633	5,632	5,361	5,360	5,304	5,304	5,304	
	C2	4,463	4,457	4,291	4,291	4,299	4,295	4,290	4,227	4,231	4,227	4,224	4,224	4,029	4,027	3,968	3,967	3,961	
	C3	1,599	1,592	1,488	1,504	1,473	1,476	1,474	1,333	1,338	1,318	1,313	1,309	1,088	1,089	1,037	1,037	1,037	

		VARIAÇÃO DIMENSIONAL DAS TRADICIONAIS												COM CICLAGEM					
[mm]		2 dias		7 dias		14 dias		21 dias		28 dias		35 dias		42 dias					
Amostra	L ₀	L ₁		L ₂		L ₃		L ₄		L ₅		L ₆							
S-C	S1	-	-	1,845	1,842	1,786	1,781	1,792	1,675	1,676	1,672	1,673	1,669	-	-	-			
	S2	-	-	1,850	1,848	1,756	1,753	1,750	1,573	1,568	1,529	1,527	1,522	1,269	1,262	1,168			
	S3	-	-	2,773	2,764	2,664	2,657	2,652	2,418	2,419	2,414	2,416	2,414	-	-	-			
	S4	-	-	4,745	4,725	4,586	4,576	4,579	4,442	4,436	4,390	4,385	4,385	4,229	4,114	4,174			
	S5	-	-	4,515	4,521	4,463	4,319	4,310	4,183	4,184	4,166	4,164	4,163	4,071	4,067	4,062			
M-1	M1 1	2,613	2,609	2,436	2,431	2,333	2,329	2,329	2,241	2,239	2,190	2,190	2,189	2,086	2,082	2,051			
	M1 2	4,546	4,544	4,539	4,345	4,341	4,270	4,267	4,181	4,185	4,133	4,130	4,130	4,031	4,029	3,988			
	M1 3	2,551	2,547	2,394	2,397	2,287	2,286	2,286	2,235	2,234	2,177	2,177	2,177	2,088	2,088	2,057			
	M1 4	3,465	3,454	3,450	3,238	3,134	3,132	3,132	0,347	3,046	2,976	2,975	2,979	2,831	2,829	2,793			
	M1 5	2,147	2,144	2,145	1,937	1,935	1,854	1,852	1,731	1,731	1,680	1,680	1,680	1,581	1,581	1,550			
M-2	M1 6	4,485	4,486	4,483	4,263	4,264	4,201	4,199	4,123	4,122	4,075	4,075	4,075	3,974	3,974	3,945			
	M2 3	2,550	2,548	2,546	2,330	2,324	2,282	2,279	2,275	2,176	2,127	2,129	2,129	2,033	2,033	2,005			
	M2 4	3,322	3,322	3,331	3,063	3,055	3,038	3,040	2,917	2,917	2,873	2,873	2,872	2,777	2,777	2,749			
	M2 6	3,812	3,802	3,800	3,537	3,535	3,517	3,515	3,361	3,361	3,310	3,308	3,309	3,206	3,206	3,182			

RESUMO – VARIAÇÃO DIMENSIONAL (COM CICLAGEM)

Formulação	Idade (dias) / Variação (mm/m)						
	0	7	14	21	28	35	42
I-A	0,000	-0,824	-0,838	-0,979	-1,109	-0,977	-1,013
I-B	0,000	-0,492	-0,655	-0,839	-0,860	-0,818	-0,841
I-C	0,000	-0,733	-0,786	-1,014	-1,034	-1,038	-1,070
S-C	-	0,000	-0,479	-1,088	-1,208	-1,308	-1,368
M-1	0,000	-0,658	-1,333	-1,829	-1,822	-1,940	-1,987
M-2	0,000	-1,133	-1,385	-1,615	-1,841	-1,859	-1,874

RESUMO – VARIAÇÃO DIMENSIONAL (COM CICLAGEM)

Formulação	Idade (dias) / Variação (mm/m)						
	0	7	14	21	28	35	42
I-A	0,000	-0,824	-0,838	-0,979	-1,109	-2,285	-2,704
I-B	0,000	-0,492	-0,655	-0,839	-0,860	-1,743	-1,831
I-C	0,000	-0,733	-0,786	-1,014	-1,034	-1,967	-2,193
S-C	-	0,000	-0,479	-1,088	-1,208	-2,080	-2,237
M-1	0,000	-0,658	-1,333	-1,829	-1,822	-2,132	-2,265
M-2	0,000	-1,133	-1,385	-1,615	-1,841	-2,216	-2,320